

découvert de nombreux exemples d'espèces qui se sont adaptées à de tels facteurs de stress.

Certains organismes ont même supporté ce que l'on pensait insupportable. L'équipe d'Andrew Whitehead, de l'université de Californie à Davis, a en effet montré que les choquemorts, des petits poissons d'estuaire de la côte est des États-Unis, ont développé une tolérance à des concentrations de PCB jusqu'à 8000 fois plus élevées que la concentration normalement létale.

Outre les facteurs physiques et chimiques, les facteurs biologiques jouent aussi un rôle majeur. En ville, une multitude d'espèces de toutes sortes se côtoient. Parmi elles se trouvent des espèces étrangères, introduites accidentellement ou intentionnellement : les plantes ornementales, les cultures agricoles et insectes nuisibles, les animaux domestiques ainsi que tous les insectes et mauvaises herbes que les individus transportent sur leurs vêtements ou dans leurs véhicules. Ces organismes forment un ensemble d'espèces qui cohabitent bon gré mal gré, sans avoir eu vraiment l'occasion de s'adapter les unes aux autres.

Ce mélange peu orthodoxe ouvre la porte à l'apparition de nouvelles stratégies d'attaque et de défense et à des phénomènes de coévolution. De nouvelles aptitudes pour se nourrir à partir de graines natives des villes pourraient apparaître avec le temps chez les perruches exotiques, tandis que les oiseaux urbains développeraient des défenses immunitaires contre des parasites venus d'ailleurs.

Tout cela crée un mélange explosif au sein duquel les espèces urbaines évoluent rapidement. Des adaptations majeures apparaissent parfois en quelques décennies, voire en quelques années seulement. La tolérance au PCB chez les choquemorts est survenue en seulement quelques dizaines de générations.

## DES ESPÈCES QUI SE MODIFIENT JUSQU'À DEUX FOIS PLUS VITE QUE DANS D'AUTRES MILIEUX

Nombreux sont ceux qui doutent que l'évolution puisse se dérouler si rapidement. Darwin lui-même écrivait : « Nous ne voyons rien de ces lents changements tandis qu'ils se produisent, jusqu'à ce que la main du temps les ait frappés au sceau des âges anciens. » Pourtant, sous la pression implacable de la sélection naturelle, l'évolution procède parfois bien plus rapidement que Darwin ne l'envisageait. C'est particulièrement vrai pour les organismes qui se reproduisent plusieurs fois par année.

Dans une métaanalyse de plus de 1600 études de cas, publiée en 2017, une équipe dirigée par Marina Alberti, de l'université de Washington, a montré qu'en effet, l'urbanisation accélère l'évolution. Les taux de changements des espèces sont plus élevés, parfois jusqu'à deux fois plus, dans les écosystèmes urbains.

Si une évolution-adaptation se produit rapidement tout autour de nous en milieu urbain, cela signifie-t-il que tout va bien ? Toutes les espèces parviendront-elles à s'adapter aux milieux modifiés par les humains ? Hélas non. Seules quelques-unes seront en mesure de survivre, de se développer, voire de coloniser les villes. Et à chaque histoire de succès, on comptera peut-être une dizaine de cas d'extinctions d'espèces, lesquelles n'auront pas pu s'adapter aux conditions de la vie citadine. La plupart des plantes et des animaux continueront à avoir besoin de réserves, d'aires protégées, de lois et d'autres mesures de protection permettant de sauvegarder des habitats non touchés par l'homme, au milieu des paysages de plus en plus urbains du futur.

# Aucun autre habitat extrême n'a eu une présence aussi étendue

Néanmoins, le fait que les écosystèmes urbains gagnent de plus en plus de terrain représente un nouveau chapitre captivant de l'histoire de la vie sur Terre. Jusqu'à aujourd'hui, aucun autre habitat extrême n'a eu une présence aussi étendue sur la planète. En tout point du globe, les villes partagent une série de caractéristiques communes auxquelles la flore et la faune s'adapteront de façon similaire. La plupart des espèces urbaines, tels les pigeons des villes, les trèfles blancs et les pissenlits, se retrouvent partout sur la planète : des naturalistes amateurs pourraient ainsi aider les chercheurs à suivre l'étendue et le rythme des changements qui touchent ces espèces. D'ailleurs, l'évolution des escargots à la coquille jaune a été révélée par des volontaires grâce à l'application SnailSnap sur leur téléphone. Des données sur plus de 12000 escargots ont ainsi été récoltées dans les villes néerlandaises.

En évoluant de façon parallèle sous l'effet de conditions urbaines comparables, toutes ces espèces intrépides pourraient devenir au fil du temps de plus en plus semblables. À l'ère de l'urbanisation galopante, l'évolution en ville se distinguerait alors de l'évolution en milieu naturel ou en milieu humain non urbain. Puisqu'un tel scénario écologique n'a pas de précédent, nous pouvons seulement tenter de deviner de quoi le futur sera fait. ■

## BIBLIOGRAPHIE

M. Schilthuizen, *Darwin Comes to Town : How the Urban Jungle Drives Evolution*, Picador, 2018.

W. Halfwerk et al., *Adaptive changes in sexual signaling in response to urbanization*, *Nature Ecology & Evolution*, publié en ligne le 10 décembre 2018.

K. M. Gaynor et al., *The influence of human disturbance on wildlife nocturnality*, *Science*, vol. 360, pp. 1232-1235, 2018.

M. Alberti et al., *Global urban signatures of phenotypic change in animal and plant populations*, *PNAS*, vol. 114(34), pp. 8951-8956, 2017.



## L'ESSENTIEL

> À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, Pavlov découvrit que tous les réflexes ne sont pas innés et qu'il pouvait conditionner des chiens à saliver au seul son d'une clochette, en associant préalablement ce son à la présentation de nourriture.

> Il démontra aussi la possibilité de modifier les conditionnements.

> Ces découvertes ont notamment inspiré les thérapies cognitivo-comportementales, qui visent à neutraliser les apprentissages inadaptés.

## L'AUTEURE



**DANIELA OVADIA**  
codirectrice du laboratoire  
Neurosciences et société  
de l'université de Pavie,  
en Italie, et journaliste  
scientifique.

# Le chien qui a fait Pavlov

En découvrant le réflexe conditionné, le médecin et physiologiste russe a profondément influencé la psychologie moderne.

**L**e chien qui se met à saliver au son d'une clochette est l'un des animaux les plus célèbres de l'histoire des sciences. Et c'est l'étude assidue de l'espèce canine qui valut en 1904 à Ivan Petrovitch Pavlov le prix Nobel de médecine et de physiologie, en récompense de ses travaux sur le fonctionnement de l'appareil digestif. Pavlov rassembla ensuite ses observations dans un ouvrage intitulé *Les Réflexes conditionnés*.

Cet essai est considéré comme un classique de la psychologie. Pourtant, au début de sa carrière, son auteur ne s'intéressait absolument pas à cette discipline, dont il tenait les fondements pour aléatoires. Ce qui passionnait le docteur Pavlov, c'était la physiologie, en particulier l'étude du métabolisme. La découverte du concept de conditionnement, incontournable aujourd'hui dans l'analyse du comportement humain et animal, fut un effet collatéral de ses travaux.

Pavlov ouvrit d'ailleurs son ouvrage sur un réquisitoire passionné, où il déplorait l'intervention de la psychologie dans la compréhension du fonctionnement cérébral à l'aube du XX<sup>e</sup> siècle. Il aurait préféré que cette étude demeurât dans le giron de la physiologie et, par conséquent, de l'analyse physique et chimique.

Pour ses expériences, Pavlov s'inspira de Descartes, qui concevait les animaux comme des machines capables de réagir à un stimulus environnemental afin de s'adapter à leur milieu. Selon le philosophe, ces réactions, dites réflexes, étaient déclenchées par le système nerveux de façon mécanique (sans intervention de «l'esprit»).

## LA QUESTION INITIALE DE PAVLOV : POURQUOI SALIVE-T-ON ?

L'un des réflexes connus depuis l'Antiquité était celui de la sécrétion salivaire en réaction à la présentation de nourriture : des glandes situées dans la bouche produisent de la salive et envoient des messages à l'estomac pour le préparer à l'arrivée de la nourriture. Le projet initial de Pavlov était de chercher si la salive des chiens différait selon qu'elle était sécrétée en réponse à la nourriture ou à divers autres stimuli. Il la recueillait donc, afin d'en mesurer la consistance et la quantité.

Toutefois, dès ses premières expériences, Pavlov observa que le réflexe salivaire du chien n'était pas uniquement déclenché par la présence de nourriture, mais aussi par l'attente de celle-ci. Il existait donc une composante psychique qui méritait d'être analysée plus en détail. >

## DU SÉMINAIRE AU PRIX NOBEL

1848

Naissance d'Ivan Petrovitch Pavlov à Riazan, en Russie centrale.



1870-1879

Longtemps attiré par une carrière ecclésiastique au sein de l'Église orthodoxe, Pavlov abandonne finalement le séminaire pour suivre des cours de mathématiques, de physique et de sciences naturelles à l'université de Saint-Petersbourg. Il s'inscrit ensuite à la faculté de médecine et de chirurgie.

1879

Diplôme de médecin.

1883

Pavlov soutient sa thèse de doctorat sur la physiologie de la circulation sanguine.

1884

Pavlov s'installe à Breslau, en Allemagne, et se perfectionne dans l'étude du système digestif des chiens. C'est dans ce domaine qu'il remportera ses plus brillants succès scientifiques.



> Pavlov étudia alors l'effet d'un grand nombre de stimuli différents – son d'une clochette, éclairs lumineux, stimulations tactiles... –, qui étaient émis en même temps qu'on apportait la nourriture à l'animal. Ce qu'il découvrit stupéfia ses contemporains: n'importe quel stimulus sensoriel pouvait être associé à la nourriture, puis, quand on l'émettait sans présentation d'aliments, déclencher à lui seul le réflexe. D'un point de vue physiologique, il n'y avait aucune différence entre la salive sécrétée à la suite de l'apparition de la nourriture et celle produite lors de la perception du stimulus associé.

### DEUX TYPES DE RÉFLEXES

Grâce à ces expériences, Pavlov distingua deux types de réflexes: le réflexe non conditionné, ou inné, dont la fonction est de préparer l'organisme à la digestion, et le réflexe conditionné, fruit d'un apprentissage inconscient lors duquel un stimulus – sonore par exemple – est associé mentalement à l'arrivée de la nourriture.

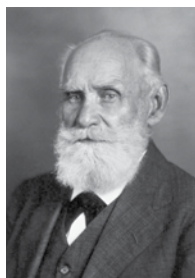
Le fait que les réflexes puissent être inculqués à l'animal et intégrés à son fonctionnement poussa Pavlov à modifier le modèle cartésien de l'animal-machine. Le savant russe y ajouta une dimension psychologique, envisagée selon un angle matérialiste qui préfigurait les neurosciences modernes. Il identifia le cortex cérébral (la couche externe du cerveau)

## Il y a toujours de la place pour de nouveaux réflexes dans le cerveau humain

comme la partie noble et malléable de l'encéphale, grâce à des expériences sur des chiens qui en avaient été privés par une opération chirurgicale: ces animaux avaient encore des réflexes non conditionnés, mais ils étaient incapables d'apprendre à associer une réponse salivaire à de nouveaux stimuli.

Pavlov montra également qu'il était possible de modifier les réactions réflexes. Après avoir conditionné un chien à saliver au son d'une clochette, il associa ce stimulus à un élément désagréable: chaque fois que l'animal l'entendait, il recevait désormais un électrochoc. Au bout de quelques séances, le son de la clochette ne provoquait plus aucune salivation.

Pavlov est nommé directeur du département de physiologie de Saint-Petersbourg, poste qu'il occupera durant quarante-cinq ans. Il fait de cette structure l'un des meilleurs centres mondiaux d'étude du corps humain.



Sous le régime soviétique, Pavlov est considéré comme l'un des plus éminents scientifiques du pays. Fort de sa position, il n'hésite pas à prendre la défense de plusieurs intellectuels durant les purges staliniennes.

1890

1922-1936

1904

Prix Nobel de médecine et de physiologie pour ses découvertes sur le système digestif.



1936

Pavlov meurt entouré de ses élèves, auxquels il décrit minutieusement son agonie. Son dernier projet était en effet de léguer à ses successeurs un modèle des phases terminales de la vie, qui aurait associé mesures objectives et sensations subjectives du mourant.

Pavlov expliqua plus avant l'utilité des réflexes. Pour lui, l'animal répondait à son environnement en activant un système de «neuroanalyse» qui l'aidait à établir la nature des stimuli alentour. Il en tirait une «neuro-synthèse», c'est-à-dire qu'il déterminait si un stimulus était associé à quelque chose de connu, pour lequel il disposait d'une réaction toute prête. Il raccourcissait ainsi son temps de réponse, un atout fondamental en cas de danger.

## LES BASES DE LA PLASTICITÉ CÉRÉBRALE

Pavlov était convaincu que ses conclusions s'appliquaient aussi à l'homme. «Plus un organisme est évolué, écrivit-il, plus il est habile [...] à s'adapter de façon précise et variée aux conditions environnementales.» La culture comme la société étaient selon lui interprétables comme des systèmes complexes de gestion des réflexes : les êtres humains se distinguaient des animaux en ce que leurs réflexes conditionnés étaient devenus beaucoup plus nombreux que leurs réflexes innés. Mais l'éducation de l'homme ne devait pas être si différente de celle de son meilleur ami canin : dans les deux cas, des stades de développement de complexité croissante se succédaient et certains apprentissages étaient «déprogrammés».

Selon Pavlov, le cerveau humain trouve toujours de la place pour emmagasiner de

nouveaux réflexes et il est toujours possible de modifier ceux qui existent. Cela signifie que même si la plupart du temps nous nous reposons sur l'habitude et sur l'apprentissage culturel, nous restons en mesure de changer nos schémas comportementaux.

C'est notamment de cette idée que sont nées les thérapies cognitivo-comportementales, qui visent à déprogrammer progressivement les apprentissages néfastes. Elles sont plus modérées que le comportementalisme pur et dur, selon lequel nous sommes le produit de nos conditionnements, à la liberté très limitée. Elles connaissent aujourd'hui une nouvelle jeunesse et leurs effets thérapeutiques sont reconnus dans de nombreuses pathologies, comme les troubles obsessionnels compulsifs et les états anxieux.

Contrairement à d'autres formes de psychothérapie, les thérapies cognitivo-comportementales ont une efficacité facilement mesurable, même selon les critères rigoureux des expérimentations cliniques. Voilà pourquoi la majorité des études confirmant l'utilité de la psychothérapie portent sur ce type d'intervention.

Nous devons donc aux chiens de Pavlov la première démonstration de la formidable nature plastique de notre cerveau, ainsi qu'une pensée rassurante : avec quelques efforts, nous pouvons toujours changer ce qui ne fonctionne pas correctement chez nous. ■

## BIBLIOGRAPHIE

D. P. Todes, **Pavlov's physiology factory**, *Isis*, vol. 88(2), pp. 205-246, 1997.

I. Pavlov, **Les Réflexes conditionnés**, PUF, 1977.

# R

## ENDEZ-VOUS

P.80 Logique & calcul  
P.86 Art & science  
P.88 Idées de physique  
P.92 Chroniques de l'évolution  
P.96 Science & gastronomie  
P.98 À picorer

# MYSTÉRIEUX DIVISEURS

La somme des diviseurs d'un nombre entier suscite une multitude d'interrogations. Depuis plus de deux millénaires, des passionnés tentent d'y répondre. Une tâche inachevée!

Marin Mersenne (1588-1648)



**L**es diviseurs de 6 sont 1, 2, 3 et 6. Si l'on ne considère que les diviseurs de 6 différents de 6, que l'on dénomme *parties aliquotes* de 6, ce sont 1, 2 et 3. Leur somme est égale à 6. Ainsi, la somme des parties aliquotes de 6 vaut 6. Depuis l'Antiquité, cette propriété inattendue intrigue les amateurs d'arithmétique et l'on appelle « nombres parfaits » les entiers, tels que 6, dont la somme de leurs parties aliquotes est égale à eux-mêmes.

L'entier 28, dont les parties aliquotes sont 1, 2, 4, 7 et 14 est le deuxième nombre parfait. Les pythagoriciens se sont intéressés à ces nombres, mais même plus tard dans l'Antiquité, on n'a trouvé que les quatre plus petits qui sont 6, 28, 496 et 8128. Au tournant de notre ère, Philon d'Alexandrie, dans son ouvrage sur la Création,

mentionne que si le monde a été créé en 6 jours et que la Lune tourne autour de la Terre en 28 jours, c'est parce que 6 et 28 sont des nombres parfaits. Saint Augustin (354-430) a repris la première affirmation.

Les nombres parfaits au-delà de 8128 sont 33 550 336, 8 589 869 056, 137 438 691 328, 2 305 843 008 139 952 128, etc. On connaît aujourd'hui 50 nombres parfaits. Ils sont tous de la forme  $2^{p-1}(2^p-1)$  où  $2^p-1$  est un nombre premier. Les valeurs de  $p$  qui donnent les nombres parfaits connus sont :

2, qui donne  $2^1(2^2-1)=6$ ; 3, qui donne  $2^2(2^3-1)=28$ ; 5, qui donne  $2^4(2^5-1)=496$ ; 7; 13; 17; 19; 31; 61; 89; 107; 127; 521; 607; 1279; 2203; 2281; 3217; 4253; 4423; 9689; 9941; 11213; 19937; 21701; 23209; 44497; 86243; 110503; 132049; 216091; 756839; 859433; 1257787; 1398269; 2976221; 3021377; 6972593; 13466917;

## NOMBRES PREMIERS ET SUITES ALIQUOTES

**L**e 3 janvier 2018, Jonathan Pace, à l'université Stanford, recherchait par ordinateur des grands nombres premiers et participait ainsi à un grand calcul distribué fonctionnant depuis plus de 20 ans. Il a eu la chance de trouver le nombre  $2^{77\,232\,917} - 1$ . C'est le plus grand nombre premier connu, et il a plus de 23 millions de chiffres décimaux. Si vous souhaitez tenter votre chance, consultez le site internet GIMPS qui coordonne cette recherche de nombres premiers records : <https://www.mersenne.org>.

Ce nombre premier est un nombre de Mersenne, c'est-à-dire de la forme  $2^k - 1$ . En espaçant les chiffres d'un millimètre, l'écriture du

nombre premier record occuperait une longueur de 23 kilomètres, et au rythme d'un chiffre par seconde, il vous faudrait 269 jours pour l'écrire. La découverte détermine le 50<sup>e</sup> nombre parfait, qui est :  $2^{77\,232\,916}(2^{77\,232\,917} - 1)$ . Ce nombre parfait a deux fois plus de chiffres décimaux que le nombre premier qui lui donne naissance. Les nombres parfaits sont ceux qui sont égaux à la somme de leurs « parties aliquotes », c'est-à-dire de leurs diviseurs différents d'eux-mêmes. Les trois plus petits sont :  
 $6 = 1 + 2 + 3$ ;  $28 = 1 + 2 + 4 + 7 + 14$ ;  
 $496 = 2^4(2^5 - 1) = 1 + 2 + 4 + 8 + 16 + 31 + 62 + 124 + 248$ .

On notera  $s(n)$  la somme des parties aliquotes de l'entier  $n$ .

Voici quelques définitions complémentaires :

- $n$  est parfait si  $s(n) = n$ .
- $n$  et  $m$  forment une paire amiable si  $s(n) = m$  et  $s(m) = n$ .
- $n_1, n_2, \dots, n_k$  constituent une chaîne sociable si :  
 $s(n_1) = n_2, s(n_2) = n_3, \dots, s(n_k) = n_1$ .
- La suite aliquote partant de  $n$  est la suite :  
 $n, s(n), s(s(n)), s(s(s(n))), \dots$