

DAVID LOUAPRE

INSOLUBLE MAIS VRAI !

Par
le créateur
de la chaîne

**SCIENCE
ÉTONNANTE**

100 millions
de vues

Ces énigmes et casse-tête
qui résistent encore
à la science



Champs sciences

**INSOLUBLE
MAIS VRAI!**

David Louapre
Illustrations de Lison Bernet

INSOLUBLE MAIS VRAI !

Ces énigmes et casse-tête
qui résistent encore à la science

Champs sciences

Les Éditions Flammarion remercient Xavier Müller
pour son aide à l'élaboration du manuscrit.

Infographies : Laurent Blondel/Corédoc

© Éditions Flammarion, Paris, 2017 ;
2023, pour cette édition « Champs »
ISBN : 978-2-0804-1946-0

Avant-propos

Dans les médias ou les ouvrages de vulgarisation, on parle souvent des succès de la science, et c'est tant mieux ! Toutefois, il faut l'avouer : la recherche scientifique est avant tout une histoire d'échecs. Bien sûr, tout travail de chercheur se fonde sur des questions encore sans réponse, mais certains de ces mystères restent entiers et jouissent d'un statut particulier.

Il s'agit de ces grands problèmes qui perdurent depuis des décennies, voire des siècles. Ils se distinguent par leur importance théorique, par l'étendue des applications qui en découleraient, parfois par leur poids historique, voire l'apparente contradiction entre leur difficulté et la simplicité de leur formulation.

Les scientifiques entretiennent une relation ambiguë avec ces grands « problèmes ouverts », comme ils les appellent. D'un côté ces questions les empêchent de dormir, de l'autre elles attirent vers la

recherche scientifique des centaines de jeunes chercheurs fascinés par ces énigmes. Je peux en témoigner, j'ai fait partie de ceux-ci quand, au sortir de mes études de physique, je décidai de commencer une thèse sur l'épineux problème de la gravité quantique (dont je traiterai au chapitre 16). Et si j'ai depuis bourlingué vers d'autres domaines scientifiques, les grandes questions qui sont les héroïnes de ce livre sont souvent la passion de toute une vie pour les chercheurs qui s'y attaquent.

Vous trouverez ici rassemblés dix-huit des plus grands problèmes de la science d'aujourd'hui. Certaines de ces questions semblent dénuées d'intérêt pratique (Comment paver un plan avec des pentagones ?), quand d'autres ont des implications technologiques ou médicales immenses (D'où vient la supraconductivité ? Comment se replient les protéines ? Existe-t-il des algorithmes plus rapides ?). Certaines nous parlent de notre destin (Pourquoi vieillit-on ? Où sont les extraterrestres ?), mais beaucoup nous interrogent avant tout sur nos origines, la création de l'Univers ou simplement l'apparition de la vie sur Terre.

Bien des problèmes décrits dans ce livre ne seront sûrement pas résolus de sitôt, ou si tel est le cas, ce sera certainement le résultat d'avancées progressives collectives plutôt que d'un coup de génie individuel, comme souvent dans la recherche scientifique moderne. De nombreuses récompenses scientifiques

ont déjà été décernées à ceux ayant fait progresser ces domaines, et nul doute que ceux qui parviendront d'une façon ou d'une autre à résoudre ces grands problèmes auront droit à leur lot de gloire et de prix Nobel (voire de prix à un million de dollars pour certains !).

En tant que vulgarisateur scientifique, j'ai longtemps pensé que la plus belle des récompenses était de susciter quelques vocations de chercheur. Si, en lisant ces pages, certains de mes plus jeunes lecteurs décident de se lancer à l'assaut de ces monuments de la science contemporaine, alors mon but aura été atteint.



1

Le Lego de l'Univers est-il au complet ?

« **N**ous ne sommes que poussières d'étoiles. » Par cette formule élégante, l'astronome et romancier Carl Sagan nous signifiait que tous les atomes de notre corps ont une histoire, qui plonge ses racines il y a des milliards d'années dans le cosmos. En effet, si tout l'hydrogène de l'Univers date du Big Bang, le carbone, l'oxygène ou l'azote ont, eux, été créés dans les forges incandescentes d'étoiles en fin de vie. Un constat qui s'applique d'ailleurs à tout ce qui nous entoure : si nous sommes des poussières d'étoiles, un nuage, une table ou une voiture le sont tout autant !

Pour forger cette matière, les atomes s'associent entre eux pour constituer des molécules, un peu comme les briques d'un drôle de jeu de Lego. Mais si l'on connaît aujourd'hui plus de 100 millions de molécules différentes¹, elles ne sont formées que

1. D'après la base de données CAS, *Chemical Abstract Services*, qui recense les molécules dont la composition est publiée dans les documents scientifiques.

d'une centaine de types d'atomes, appartenant à autant d'éléments chimiques. À l'état naturel, ils vont de l'hydrogène, le plus simple, jusqu'au plus lourd, l'uranium – et nul besoin d'aller dans une mine du Gabon pour en trouver, il y en a dans l'eau de mer ! Mais cette liste est-elle vraiment complète ? Le Lego de l'Univers contient-il seulement une centaine de pièces ?

Napoléon mangea allègrement six poulets sans claquer après

L'idée d'éléments de matière qui composeraient tout ce qui nous entoure est ancienne, puisqu'elle date du philosophe grec Démocrite et de son mentor Leucippe, qui l'avaient définie comme « ce qu'on ne peut diviser ». Largement ignorée pendant deux millénaires, cette idée ressurgit à la fin du XVIII^e siècle, avant qu'en 1803 le chimiste anglais John Dalton présente sa « théorie atomique ». Certes, il fallut encore un siècle pour prouver définitivement l'existence des atomes par des expériences, mais dès les travaux de John Dalton, on avait commencé à répertorier les différents éléments et à les ranger selon leurs caractéristiques propres.

De toutes les tentatives pour les classer, la plus fameuse reste bien sûr le célèbre tableau du chimiste russe Dmitri Mendeleïev, publié en 1869 (figure 1, p. 15). Vous avez peut-être rencontré ces étranges

phrases qui servent à mémoriser cette classification. Pour se rappeler des éléments de la troisième ligne, des physiciens irrespectueux ont forgé une astuce mnémotechnique : « **N**apoléon **M**angea (pour **Mg**) **A**llègrement **S**ix **P**oulets **S**ans **C**laquer **A**près (pour **Ar**) », soit sodium, magnésium, aluminium, silicium, phosphore, soufre, chlore et argon.

Comment a-t-il procédé ? Lorsqu'il avait commencé à constituer son tableau, Mendeleïev avait noté une chose étonnante : si l'on range les éléments par ordre de masse atomique croissante, deux éléments proches ne posséderont pas nécessairement des propriétés chimiques analogues. Prenons un exemple : le 10^e élément, le néon, n'a absolument rien à voir avec le 9^e, le fluor, ni avec le 11^e, le sodium. Le néon est un gaz dit « noble », qui ne réagit presque pas avec les autres éléments. À côté de ça, le sodium est un métal mou et très réactif, tandis que le fluor forme à température ambiante un gaz toxique très corrosif. Aucun rapport, en apparence...

Toutefois, derrière ce comportement en apparence aléatoire, Mendeleïev avait noté dans les propriétés la présence de certaines régularités, qui semblaient revenir périodiquement. Le néon (numéro 10) n'est pas le seul gaz noble : c'est aussi le cas de l'hélium (numéro 2), de l'argon (18) ou du krypton (36). De même, le lithium (3), le potassium (19) et le rubidium (37) sont des métaux alcalins qui se comportent de manière similaire au

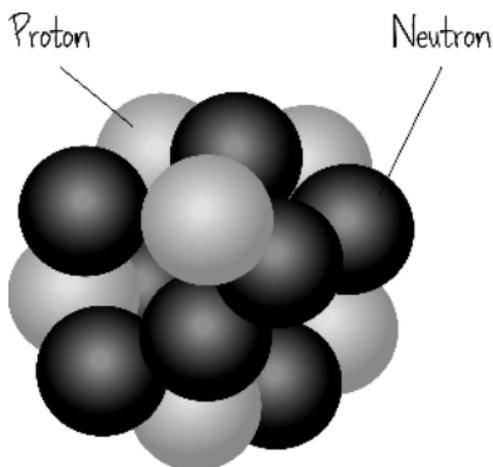
sodium. Mendeleïev montra alors qu'il était possible de ranger les éléments dans un tableau, en regroupant dans une même colonne les éléments ayant des propriétés semblables.

Les mots cachés atomiques

À l'époque, Mendeleïev ne connaissait qu'une cinquantaine d'éléments, mais son arrangement en tableau lui permit de repérer quelques cases vides, et de prédire l'existence de nouveaux éléments qui furent découverts plus tard ! Et tout ça sans comprendre vraiment l'origine de cette classification, car l'intimité de la matière était alors une *terra incognita*.

Aujourd'hui, on comprend parfaitement cet arrangement grâce aux théories qui régissent la structure des atomes. Un atome est formé de protons, de neutrons et d'électrons, et un type d'atome, c'est-à-dire un élément chimique, se caractérise à l'aide de deux nombres : son numéro atomique, noté Z , qui correspond à son nombre de protons¹ et qui détermine sa position dans le tableau ; et sa masse atomique, notée A , qui correspond à la somme de son nombre de protons et de neutrons et détermine sa masse (on néglige les électrons, dont la masse est presque 2 000 fois inférieure à celle des

1. Et pour un atome dans son état normal, à son nombre d'électrons, ce qui permet d'assurer la neutralité électrique de l'ensemble. Dans le cas contraire on a affaire à un ion.



2. Représentation schématique d'un noyau atomique, composé de protons et de neutrons. Le nombre de protons est le numéro atomique (Z) du noyau, tandis que la somme du nombre de protons et de neutrons est la masse atomique du noyau (A). Le numéro atomique donne son nom à l'élément, tandis que la masse atomique sert à distinguer les différents isotopes. Ainsi, ce noyau comporte 6 protons ($Z = 6$, il s'agit du carbone) et 8 neutrons ($A = 14$). On le nomme donc « carbone 14 ».

fait que sa masse atomique se situe généralement autour du double de son numéro atomique (ou légèrement plus).

Une question demeure : pourquoi les propriétés des atomes dépendent-elles de manière si bizarre de leur numéro atomique ? Pourquoi un atome de numéro atomique 55 possédera-t-il des propriétés radicalement différentes du numéro 53, 54 ou 56 ? Cette situation est assez rare en physique : si l'on effectue une expérience faisant intervenir un objet pesant disons 55 grammes, on se doute que le résultat sera assez similaire à ce qu'on obtiendrait s'il

pesait 53, 54 ou 56 grammes. Pour l'atome toutefois, la structure discontinue imposée par les lois de la mécanique quantique dicte un comportement radicalement différent, qui est à l'origine de toute la richesse de la classification périodique.

Nés et morts dans une étoile

Parmi la grosse centaine d'éléments qu'on connaît aujourd'hui, un grand nombre existent à l'état naturel, mais beaucoup ont été créés par l'être humain. En général, pas pour longtemps, puisque ces éléments artificiels sont instables et subissent des désintégrations radioactives. Il est d'ailleurs permis de penser que tous ces éléments que nous fabriquons le sont aussi par la nature, par exemple lors de l'explosion d'étoiles appelées « supernovæ », mais que leur stabilité limitée les a empêchés d'arriver intacts jusqu'à nous.

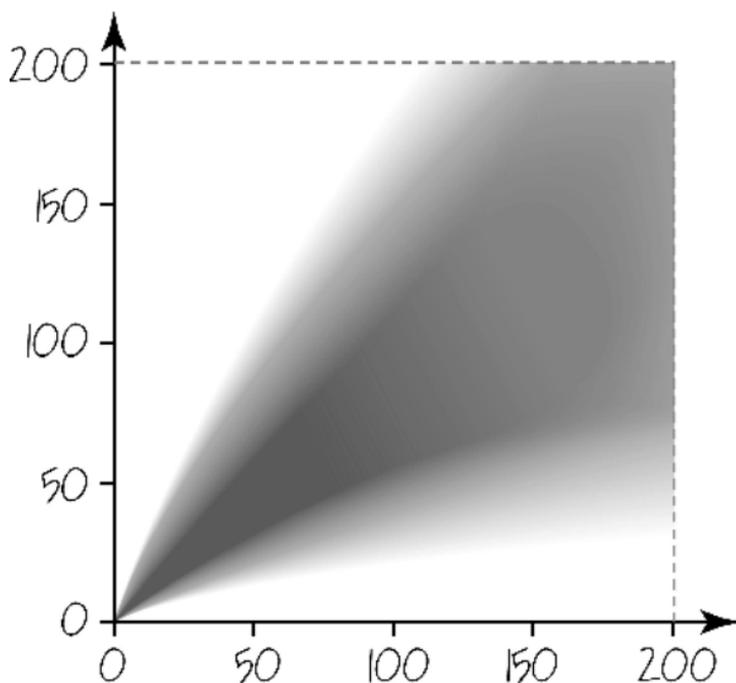
Il est possible de comprendre la notion de stabilité des noyaux atomiques à partir de la notion d'énergie. Tout noyau possède une certaine énergie qui dépend de son nombre de protons et de neutrons. Or les noyaux, comme beaucoup d'autres systèmes physiques, ont toujours tendance à rechercher un état d'énergie minimale (voir chapitre 5 p. 74). Lâchez un ballon du haut d'une rue en pente, il roulera vers le bas pour minimiser son énergie de pesanteur.

Reste à estimer l'énergie d'un noyau, ce que les physiciens savent faire à partir de différentes formules. La figure 3 (p. suivante) représente cette énergie en fonction du nombre de protons et de neutrons qu'un noyau peut posséder. Avec un tantinet d'habitude, on remarque qu'il existe une sorte de vallée dans laquelle l'énergie est minimale, et qui correspond à un nombre de neutrons égal ou légèrement supérieur au nombre de protons. Ce sont les noyaux les plus stables, et ceux que l'on peut rencontrer à l'état naturel.

Bombardement atomique

Je vous ai expliqué qu'une partie des éléments chimiques de la classification périodique étaient artificiels. Dans la nature, l'élément le plus lourd qu'on observe est l'uranium, dont le numéro atomique est 92. Tous les éléments qui se situent après lui dans la classification périodique ont été, sur Terre, créés par nous ! Mais comment produit-on de nouveaux atomes ? En mélangeant des fioles dans un laboratoire de chimie ? Eh bien non, les méthodes usuelles sont plus violentes puisqu'il s'agit de faire s'entrechoquer des éléments existants...

La plus élémentaire consiste à bombarder un noyau à l'aide de neutrons : partons d'un noyau d'uranium 238 et bombardons-le avec des neutrons à très grande vitesse (environ 10 000 km/s). Suite à l'absorption d'un neutron, un noyau deviendra de



3. Représentation de l'énergie des noyaux atomiques en fonction du nombre de neutrons et de protons qu'ils contiennent ¹. Les zones sombres correspondent aux énergies les plus faibles, et donc aux noyaux les plus stables, tandis que les couleurs claires et le blanc représentent les énergies les plus élevées. On note une zone de minimum d'énergie, en forme de vallée : elle correspond à un nombre de neutrons sensiblement égal ou légèrement supérieur au nombre de protons.

l'uranium 239, et la désintégration de deux neutrons en protons permettra ensuite d'obtenir du plutonium 239. C'est d'ailleurs ainsi que l'on fabrique ce combustible nucléaire dédié aux applications civiles et militaires.

1. Il s'agit pour être précis de l'énergie par nucléon, c'est-à-dire de l'énergie du noyau divisée par sa masse atomique A .

Un deuxième type de bombardement possible consiste cette fois à envoyer un noyau sur un autre noyau ! En envoyant un noyau d'hélium (numéro $Z = 2$) sur un noyau d'einsteinium ($Z = 99$), on a pu obtenir un nouvel élément de numéro atomique 101, baptisé « mendelevium », en l'honneur du chimiste russe. Balancez du néon ($Z = 10$) sur de l'uranium ($Z = 92$) et vous formerez l'élément de numéro atomique 102, le nobélium. Du zinc ($Z = 30$) sur du plomb ($Z = 82$) ? Voici qu'apparaît le numéro 112, ou copernicium. À ce jour, l'élément le plus lourd qui ait été officiellement fabriqué a été créé en bombardant du californium Cf avec du calcium Ca, pour forger l'élément de numéro 118. Mais on ne peut pas dire qu'on en obtient des tonnes : l'équipe russe à l'origine de la découverte en aurait produit un seul atome en 2002, et seulement deux supplémentaires en 2005 – c'est assurément l'élément le plus rare de la planète !

Comme vous le constatez, les noms choisis pour ces nouveaux venus font référence à des savants célèbres. Mais comment les baptise-t-on ? Eh bien, pas n'importe comment ! Le choix obéit à des règles très codifiées dictées par l'IUPAC¹, et les noms sélectionnés doivent généralement faire référence à un lieu ou une personne. Ainsi, le numéro 113 a été baptisé « nihonium » (Nh), en référence à « Nihon » qui est une manière de dire « Japon » en japonais. Le 115

1. International Union of Pure and Applied Chemistry.

est le « moscovium », pour Moscou, et le 117 le « tennessine » (en référence au Tennessee où se situe notamment le célèbre laboratoire d'Oak Ridge). Enfin, le numéro 118 a été baptisé « oganesson », en hommage au physicien nucléaire russe Yuri Oganessian qui a dirigé l'équipe ayant conduit à sa découverte.

Un futur ouvert

À ce stade, on peut légitimement se demander jusqu'où ira cette course à la production de nouveaux éléments : y a-t-il une limite à la classification périodique ? Ou bien arrivera-t-on à produire toujours des éléments de plus en plus lourds ?

Rien n'est moins sûr. Le premier problème qui se pose est que ces éléments sont extrêmement instables. La demi-vie¹ du numéro 113 n'est que de 8 secondes ; elle est de 800 millisecondes pour le numéro 115 et 50 millisecondes pour le 117. Quant à l'oganesson, le numéro 118, on estime que sa demi-vie est de 0,7 milliseconde seulement !

Il semble donc que l'on soit rapidement limité par la stabilité des noyaux qu'on cherche à créer. Pourtant, Yuri Oganessian lui-même a travaillé sur le fait qu'il existe peut-être, pour des noyaux nettement plus gros, ce qu'on appelle un « îlot de stabilité ». D'après ses calculs, les noyaux possédant

1. La durée mise par un élément fabriqué pour que la moitié de la quantité produite se désintègre.

184 neutrons pourraient en effet être significativement plus stables que les autres, avec 120, 124 et 126 protons par exemple. Peut-être ne sommes-nous plus si loin de pouvoir les produire et les observer ? Mais seront-ils aussi stables que prévu ? Au pire, Oganessian a également prédit un élément superstable pour $Z = 164$ et $A = 482$, mais qui risque d'être encore inaccessible un bon moment !

Arrivera-t-on un jour à le fabriquer ? Difficile à dire, car une autre limite pourrait exister, qui nous empêcherait de créer de nouveaux éléments : les électrons. En effet, pour constituer un véritable atome, le noyau doit ensuite s'associer avec des électrons, qui orbiteront autour de lui. Un modèle atomique simple permet notamment de calculer la vitesse des électrons les plus proches du noyau, ceux dont, en quelque sorte, l'orbite est la plus basse.

Cette vitesse est égale à :

$$Z \times \alpha \times c$$

où c est la vitesse de la lumière, Z le nombre de protons, et α une constante sans unité qui vaut environ $1/137$, et qu'on appelle la constante « de structure fine ». Cette constante joue un rôle essentiel en physique, puisque c'est elle qui caractérise l'intensité de la force électromagnétique (voir chapitre 18 p. 257) ¹.

1. Pour les curieux, cette constante ne sort pas de nulle part : elle est égale au quotient de la charge de l'électron au

Selon cette simple formule, dès que Z est supérieur à 137, alors la vitesse de l'électron le plus rapide dépasserait celle de la lumière ! Autrement dit, produire un atome doté de 138 protons réclamerait peut-être... une énergie infinie¹ ! Il est donc possible que l'élément chimique de numéro atomique le plus élevé soit le numéro 137, baptisé provisoirement « feynmanium », en hommage au physicien Richard Feynman qui fit cette observation. À la suite de cette analyse, des calculs plus précis ont montré que la limite pourrait se situer plus loin, peut-être vers le numéro 172.

Mais conclure sur cette question réclamera des collisions encore plus violentes, des accélérateurs bien plus puissants – et des détecteurs furieusement sensibles. Mais si jamais c'était le cas, alors la classification des atomes serait définitivement achevée : le grand Lego de l'Univers serait enfin au complet.

carré par le produit de la vitesse de la lumière et de la constante de Planck !

1. On pourrait imaginer qu'il serait possible de produire un noyau atomique sans que des électrons ne viennent s'y associer. Toutefois, si la limite discutée est atteinte, le champ créé par le noyau serait suffisant pour arracher des paires électrons/positons aux fluctuations quantiques du vide, et ainsi neutraliser les protons du noyau !



Pourquoi dort-on ?

Si vous vous situez dans la moyenne des êtres humains, vous passez probablement entre 7 et 8 heures par jour à dormir, soit environ le tiers de votre temps. Sur l'ensemble d'une vie, cela représente plus de vingt-cinq ans passés au lit ! Et pourtant, aussi incroyable que cela puisse paraître, on ne sait pas vraiment pourquoi nous avons besoin de dormir.

Bien sûr, on dort « parce qu'on est fatigué », mais la fatigue n'est que le moyen par lequel notre organisme nous signale un besoin. De même, on mange « parce qu'on a faim », mais cette sensation est au service d'une fonction physiologique : les nutriments sont nécessaires pour que notre corps fonctionne.

Dans le cas du sommeil, nous n'avons pas de réponse claire : pour quelle raison biologique avons-nous besoin de dormir ? S'il existe plusieurs hypothèses crédibles pour expliquer le rôle du sommeil, aucune ne s'est encore définitivement imposée.

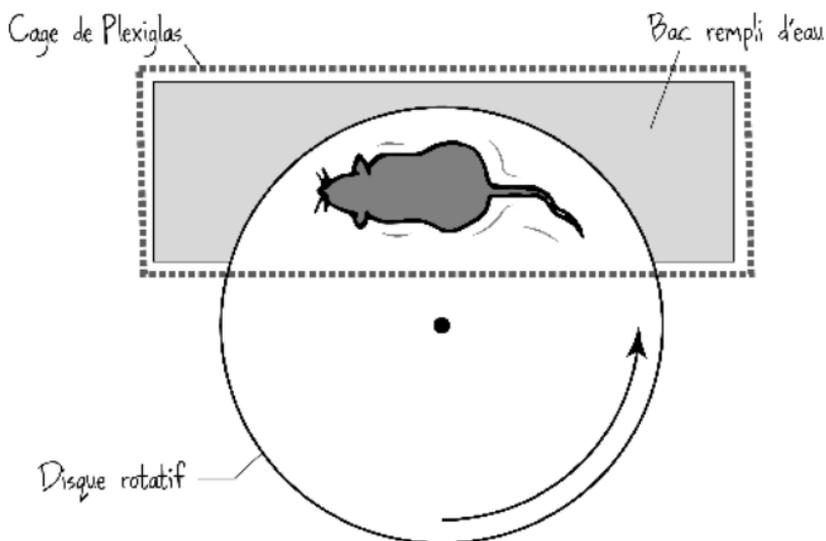
Privé de sommeil !

Pour essayer de comprendre le rôle fondamental du sommeil, il existe une méthode simple : arrêter de dormir et regarder ce qui se passe ! Mais il est évidemment problématique de réaliser des expériences bien contrôlées sur l'être humain. On connaît quelques cas attestés de personnes n'ayant pas dormi pendant plus de 10 jours, comme l'Américain Randy Gardner resté éveillé 11 jours en 1964, ou l'Australienne Sophie Beckett qui aurait tenu presque 19 jours en 1998. Mais ces performances sont souvent mal documentées sur le plan scientifique.

Pour contourner le problème, une expérience très connue a été publiée en 1983 par Allan Rechtschaffen et ses collègues : on prend des rats, et on les empêche de dormir par une méthode sournoise appelée le « disque au-dessus de l'eau ». Dans cette expérience, les rats sont placés dans une cage dont le bas est rempli d'eau, mais en surélévation sur un disque dont une moitié seulement est à l'intérieur de la cage (figure 1).

Tout va bien pour ces animaux, qui ont accès à de l'eau et de la nourriture, sauf que le disque se met régulièrement à tourner, ce qui les oblige à se déplacer sous peine d'être éjectés et de tomber dans l'eau. Et chaque fois qu'ils menacent de s'endormir, le disque tourne et les maintient éveillés... ce qui se produit en moyenne une centaine de fois par jour.

Les effets de la privation de sommeil sont sans appel : tous les rats soumis à cette expérience



1. L'expérience du « disque au-dessus de l'eau » d'Allan Rechtschaffen visait à maintenir des rats en état d'éveil pendant de longues périodes. Les animaux sont surveillés par électroencéphalogramme et électromyogramme. Toute baisse de leur activité entraîne une rotation du disque, ce qui les réveille.

meurent dans les deux semaines, soit bien plus rapidement que lors d'une privation de nourriture. Au cours de l'expérience, ils développent des lésions sur la peau, et maigrissent beaucoup, bien qu'ils mangent autant, voire plus qu'en temps normal... Leur système immunitaire est comme déboussolé ; pourtant, à l'autopsie, il n'a pas été possible de déterminer la cause exacte de leur mort.

Malgré le caractère très impressionnant de cette expérience, il semble qu'il faille en modérer les conclusions. D'une part, chez la souris ou le pigeon, elle a été reproduite sans entraîner la mort. D'autre part, même chez les rats, ces derniers ne meurent

plus si on utilise des méthodes de réveil moins brutales : pour certains chercheurs, la cause de la mort dans l'expérience de Rechtschaffen serait surtout le stress intense engendré par la méthode du « disque au-dessus de l'eau ».

Évidemment, cette expérience n'a pas été tentée chez l'être humain, mais à ce jour il n'a jamais été rapporté de cas de personne morte « par manque de sommeil » (même si, pour être exhaustif, il faudrait consulter les données classées secrètes issues d'expériences menées à des fins militaires ou de torture...). Et si vous pensez tenter l'expérience, sachez que pour des raisons de sécurité, le livre *Guinness* refuse de considérer ces records.

Vols long-courriers sans pause

Outre les conclusions mitigées de ces étranges « expériences », force est de constater qu'il existe dans le règne animal de nombreuses espèces se privant parfois volontairement de sommeil. C'est le cas de certains oiseaux lors de leur migration, comme le martinet à ventre blanc (figure 2), dont une étude rapporte qu'il peut rester en vol plus de 200 jours sans se poser¹ !

Chez les mammifères, les dauphins restent parfois éveillés plusieurs jours d'affilée si on les stimule avec des jeux. Mieux : la maman et le bébé dauphin ne

1. Liechti, Felix *et al.*, « First evidence of a 200-day non-stop flight in a bird », *Nature Communications*, n° 4, octobre 2013.



2. Le martinet à ventre blanc, que l'on trouve dans les Alpes et les zones escarpées et montagneuses du sud de l'Europe, peut atteindre 60 cm d'envergure. Il migre en Afrique tropicale en septembre, pour revenir au mois de mars.

dorment presque pas pendant les six semaines qui suivent la naissance ! De manière surprenante, ces privations volontaires ne s'accompagnent pas du besoin de récupérer la dette de sommeil accumulée, comme cela peut être le cas pour nous après une nuit blanche. Il faut dire qu'il a été montré que, dans certaines circonstances, des cétacés ou des oiseaux semblaient capables de mettre en sommeil un seul de leurs deux hémisphères cérébraux, ce qui pourrait contribuer à les maintenir musculairement actifs, tout en bénéficiant d'une forme de sommeil.

Dormir moins pour s'accoupler plus

Il y a plus étrange : dans un article récent, des chercheurs ont examiné une population de bécasseaux