

Moins de fèces, moins de phosphore

par Jean-Louis Hartenberger, sur le blog Histoires de mammifères

Depuis 10 000 ans, l'explosion démographique humaine a provoqué la quasi-éradication de la plupart des « grands mammifères » terrestres sur tous les continents. Au total, ce sont près de 150 espèces (mammouth, mastodon, paresseux et castors géants, smilodon, etc.) qui ont disparu. Plus récemment, cette vague d'extinctions a frappé les mammifères marins : la baleine bleue a vu ses effectifs divisés par 100 en quelques décennies, au point qu'elle est au bord de l'extinction malgré l'interdiction de sa chasse

tous les éléments chimiques présents dans les excréments, le phosphore est un élément clé. C'est un constituant majeur de la structure de l'ADN et un acteur crucial de la respiration, du métabolisme cellulaire ou de la photosynthèse.

Hormis les éléments d'origine minérale, une large part des transferts en éléments nutritifs est assurée par les organismes vivants eux-mêmes. Les mammifères marins rejettent dans leurs fèces de nombreux déchets azotés. Leur transfert vers le continent est assuré par les oiseaux de mer et les poissons migrateurs

été divisés environ par 1 000 depuis 20 000 à 30 000 ans. Enfin, les transferts par les oiseaux de mer et les poissons migrateurs ont diminué de 96 %.

Mais les animaux d'élevage ne jouent-ils pas aujourd'hui le même rôle que les faunes sauvages autrefois, d'autant que leur biomasse est plus élevée ? C'est peu probable. D'une part, la plupart des élevages industriels sont confinés par des clôtures ou dans les étables. D'autre part, les individus d'un troupeau ont une alimentation similaire et se nourrissent et défèquent tous dans les mêmes lieux. Ainsi, les flux d'engrais sont très contrôlés, ce qui fait obstacle à leur diffusion dans les écosystèmes.

Le cas du phosphore est particulièrement intéressant. Les ressources en phosphore minéral sont limitées : les spécialistes estiment les réserves mondiales à 50 ans d'exploitation. Comment dès lors assurer la productivité de l'agriculture moderne si l'on est privé du recyclage par les organismes vivants ? Par ailleurs, le phosphore est aujourd'hui très mal réparti dans les sols. Dans certaines régions, des concentrations élevées entraînent de l'eutrophisation (comme les algues vertes sur les côtes bretonnes), alors que dans d'autres régions, il fait défaut. Ne faudrait-il pas envisager sa redistribution en mettant à profit des agents naturels qui peuvent le stocker et le répartir naturellement dans les écosystèmes, à savoir les mammifères ? Comme il a été dit il y a longtemps, labourage et pâturage sont deux mamelles... ■



© Vadim Petrakov / Shutterstock.com

Le rôle des excréments des grands mammifères dans le cycle du phosphore est important.

en 1968. Pour les cachalots, l'avenir est presque aussi sombre.

Les ressorts de l'extinction des grands mammifères ont été largement débattus, mais peu d'études ont été consacrées à son impact écologique. Des biogéochimistes des universités d'Oxford, Cambridge et Princeton se sont penchés sur cette question, en se concentrant sur l'évolution des transferts d'éléments nutritifs, et notamment du phosphore (http://bit.ly/pls459_scilogs).

La digestion par les mammifères accélère le recyclage des éléments nutritifs. En particulier, la matière végétale est scindée en éléments facilement décomposables, et les déjections constituent un engrais naturel azoté qui profite à tout l'écosystème. Parmi

(saumons, anguilles, etc.). Sur terre, le recyclage est assuré par les herbivores, dont les excréments enrichissent les sols et nourrissent les végétaux.

Christopher Doughty et ses collègues ont d'abord estimé les quantités d'excréments produits par les grands mammifères avant leur extinction et aujourd'hui. Ils ont ensuite quantifié les concentrations en phosphore de ces engrais naturels. Leur conclusion est que la masse de phosphore disponible grâce aux déjections des cétacés, qui approchait autrefois 340 000 tonnes par an, a diminué de 77 % depuis le début de la grande pêche baleinière il y a environ trois siècles. De même, les apports en phosphore dans les sols dus aux grands mammifères terrestres auraient



Jean-Louis HARTENBERGER, paléontologue spécialiste de mammifères, est l'auteur du blog Histoires de mammifères (www.scilogs.fr/histoires-de-mammiferes/).

Retrouvez tous nos blogueurs sur www.SciLogs.fr et suivez-les sur les réseaux sociaux.

3^{ÈME} ÉDITION

UNIVERS CONVERGENTS

SCIENCES - FICTIONS - SOCIÉTÉ

Le Ciné Club de l'Institut Henri Poincaré

Au Cinéma Grand Action,
5 rue des Écoles, Paris 5.

TOUS LES DERNIERS
MARDIS DU MOIS - 19^H30

En présence de Cédric Villani, Jean-Philippe Uzan
et de nombreux intervenants.

> 26 JANVIER - *Beautiful mind*

En mathématiques, le mythe du génie est-il toujours d'actualité ?

> 16 FÉVRIER* - *The time machine*

Le temps est-il une dimension comme les autres ?

> 29 MARS - *Frankenstein*

L'éthique est-elle la seule limite à la recherche scientifique ?

> 26 AVRIL - *Moonwalk one*

Comment a-t-on réalisé le « grand pas pour l'humanité » ?

> 31 MAI - *Contact*

Quelle limite entre science et croyance ?

> 28 JUIN - *La grotte des rêves perdus*

Qu'apporte la science à l'histoire et à l'art ?

> Entrée libre sur réservation
15 jours avant chaque séance :
www.ihp.fr/fr/cine-club-2016

En partenariat avec



UPMC
SORBONNE UNIVERSITÉS



GRAND ACTION

POUR LA
SCIENCE

© image centrale créée sur ordinateur par les membres du projet HEVEA
Mise en page : Marine Giacomini • marinegiacomini.wix.com/marinegiacomini



Les neurosciences ont ouvert de multiples fenêtres sur le rêve, qui occupe plus du quart de notre vie. En dévoilant ce qu'il contient, elles révèlent peu à peu à quoi il sert.



Pourquoi rêvons-nous ?

Isabelle Arnulf

A première vue, les rêves ressemblent à un foisonnement hétéroclite d'événements aux lois insolites, à la construction désordonnée, aux sujets inattendus. Ils sont emplis d'images, de sons, d'odeurs, de goûts, de sensations tactiles et d'émotions. Souvent, un ou plusieurs scénarios successifs s'y déroulent.

Depuis plus d'un siècle, psychologues et neuroscientifiques cherchent à percer le sens de cette « pensée propre au sommeil ». Les difficultés sont de taille. Outre qu'ils défient souvent toute logique, les rêves semblent enfermés dans le cerveau du dormeur, incapable de communiquer pendant leur déroulement – sauf si c'est un « rêveur lucide », comme nous le verrons plus loin.

Les chercheurs ont donc déployé toute une batterie d'instruments de mesure pour, dans un premier temps, comprendre le fonctionnement du cerveau endormi. La polysomnographie combine ainsi l'électroencéphalographie (la mesure des courants à la surface du crâne avec des électrodes) et des mesures physiologiques à l'aide de

L'ESSENTIEL

- Les chercheurs recueillent les rêves au réveil, les observent « en direct » chez ceux qui parlent ou bougent en dormant et analysent l'activité cérébrale des rêveurs. Dans certains cas, ils parviennent même à interagir avec eux.
- Ils percent ainsi les lois du rêve, mesurant notamment comment le temps s'y écoule, et montrent qu'il remplit de multiples fonctions.
- Les rêves entraîneraient par exemple à affronter les menaces, à gérer les émotions négatives ou à comprendre les autres.

© TonyRto Images/Corbis

capteurs : mouvements des yeux, tonus musculaire, rythme cardiaque, volume respiratoire... Grâce à ces techniques, on sait depuis plus de cinquante ans que le sommeil comporte deux phases, qualifiées de sommeil lent et de sommeil paradoxal ; et contrairement à une idée répandue, nous ne rêvons pas seulement pendant ce dernier, mais aussi pendant une bonne moitié du sommeil lent (voir l'encadré page 29).

Sur la piste des rêves

Toutefois, malgré leur richesse, ces mesures ne donnent aucun accès au vécu subjectif du dormeur. Autrement dit, que se passe-t-il dans ses rêves ?

C'est en combinant plusieurs approches que les chercheurs ont commencé à y voir plus clair... et à percevoir que les rêves ont de multiples fonctions.

La méthode la plus simple, et la plus ancienne, consiste à attendre que le dormeur se réveille et à lui demander de raconter son rêve. Le défi est alors de recueillir ses souvenirs avant qu'ils ne s'effacent.



On utilise des « carnets de rêves », où le dormeur transcrit ou dessine ce dont il se rappelle, et, plus souvent aujourd'hui, des *smartphones* auxquels il dicte son récit.

Nombre de ces récits sont consignés dans des « banques de rêves », telle la Dream-Bank (www.dreambank.net), créée par William Domhoff, de l'université de Californie à Santa Cruz. Cette banque contient plus de 20 000 rêves, classés par source : un dossier contient par exemple les rêves de 120 enfants de classes primaires, recueillis un jour donné dans une école de San Francisco ; un autre, plus de 4 000 rêves d'une femme nommée Barbara, collectés pendant trente années de sa vie...

L'étude systématique de ces immenses collections a révélé un certain nombre de points communs (voir l'encadré page 30).

Ainsi, les rêves contiennent en moyenne deux fois plus d'émotions négatives (peur, colère, honte) que positives (joie, bonheur, plaisir). Autre exemple, le sexe y est rare : il n'est présent que dans 2 % des rêves des hommes adultes et 0,5 % de ceux des femmes.

Cette méthode permet aussi de comparer les rêves de groupes différents : enfants et adultes, hommes et femmes, voyants et aveugles, valides et paraplégiques... En 2008, William Domhoff a par exemple montré que les Indiens Navajos ont le même taux d'agressivité en rêve que les Suisses, mais que cette agressivité est plus physique chez les premiers et plus verbale chez les seconds ! D'autres résultats sont plus attendus, tel celui obtenu par la neurobiologiste danoise Amani Meaidi en 2014 : les rêves des aveugles contiennent

davantage de sons et de sensations tactiles que ceux des voyants.

Le recueil de rêves est une méthode puissante, mais plus ou moins efficace selon la capacité de chacun à se remémorer ses songes nocturnes. Cette capacité est plus élevée chez les femmes et les personnes créatives, et s'améliore avec l'entraînement. En outre, la récolte est plus fructueuse quand on réveille brutalement le dormeur et qu'on recueille ses souvenirs sans délai.

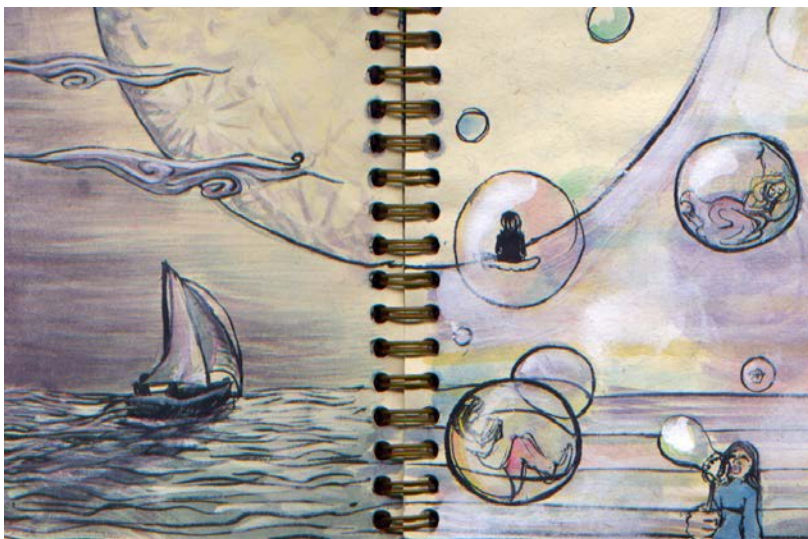
Malgré tout, la méthode reste limitée par l'oubli et le manque de précision. Au réveil, le dormeur ne se rappelle souvent pas avoir rêvé ou en a juste le sentiment vague, sans réussir à préciser le contenu de ses songes (on parle de rêve blanc). L'écrivain Jorge Luis Borges (1899-1986) soulignait déjà la difficulté à « attraper cette corde de sable ». L'idéal serait donc d'observer directement le rêve en cours. Mais comment faire ?

Deux tiers des gens parlent en dormant

Par chance, le dormeur n'est pas totalement immobile et inexpressif pendant la nuit. Il manifeste toute une série de comportements nocturnes, sur lesquels se sont penchés les chercheurs afin de déterminer s'ils traduisent le contenu du rêve. Le plus fréquent est la parole endormie, ou somniloquie. Plus de 70 % des personnes parlent en dormant, même si ce n'est pas systématique (moins de 1 % le font chaque nuit).

Les humains ne sont pas les seuls somniloques, beaucoup d'animaux « parlent » pendant leur sommeil : brefs jappements chez les chiens, hennissements chez les chevaux, chantonement de certaines perches... En 2011, Dorothee Kremers, de l'université de Rennes, et ses collègues ont même montré que des dauphins captifs endormis émettent des sons identiques aux chants de baleines qu'ils ont entendus dans l'aquarium. Le naturaliste français Georges Louis Leclerc, comte de Buffon (1707-1788), évoquait déjà le cas des oiseaux dans son *Histoire naturelle* : « Non seulement [les rossignols] dorment, mais ils rêvent, et d'un rêve de rossignol, car on les entend gazouiller à demi-voix et chanter tout bas. »

Chez les humains, le récit du dormeur à son réveil concorde bien avec les paroles qu'il prononce pendant son sommeil, ce qui montre que ces dernières expriment sa pensée lors du rêve. Voici un exemple de



LES CARNETS DE RÊVES sont de petits cahiers dans lesquels les dormeurs dessinent ou racontent leurs rêves. Ils révèlent toute l'exubérance et l'étrangeté des songes.

Nous ne rêvons pas que pendant le sommeil paradoxal

Pendant le sommeil paradoxal, l'une des deux grandes phases du sommeil, les yeux bougent sous les paupières, comme si les dormeurs regardaient un film intérieur.

En outre, ils se souviennent plus souvent d'avoir rêvé quand on les réveille lors de cette phase (ils ont alors un souvenir de rêve dans 80 % des cas, contre 50 % si on les réveille lors de la phase qualifiée de sommeil lent).

C'est pourquoi, après la découverte du sommeil paradoxal dans les années 1950, certains chercheurs ont cru que nous rêvions durant cette phase uniquement. Cette croyance est encore tenace dans les ouvrages de vulgarisation. Pourtant, au début des années 1960, le psychologue

américain David Foulkes et ses successeurs ont montré la présence de rêves longs et scénarisés pendant le sommeil lent. C'est le cas même lors d'une courte sieste l'après-midi, qui ne contient habituellement pas de sommeil paradoxal.

Nombre d'études ont depuis confirmé que ce dernier n'est

pas le seul habitacle du rêve. En 2012, nous avons par exemple supprimé le sommeil paradoxal toute la nuit chez des sujets à l'aide d'un médicament, sans jamais abolir leur faculté de rêver.

Tout concourt donc à indiquer que l'activité mentale ne s'arrête jamais au cours du sommeil, mais qu'elle est seulement plus ou moins mémorisée. Pourquoi ces différences ? En 2011, Luigi de Gennaro, de l'université de la Sapienza, à Rome, a montré que l'on se souvient mieux d'un rêve si certaines ondes particulières, qui favorisent aussi la

mémorisation pendant l'éveil, sont très intenses dans le cerveau juste avant que l'on se réveille.

En outre, diverses études ont révélé des différences qualitatives entre les récits obtenus en sommeil lent et en sommeil paradoxal, sans doute dues aux variations de l'activité cérébrale entre ces deux phases. Dans les rêves, les émotions sont par exemple plus intenses pendant le sommeil paradoxal, ce qui pourrait s'expliquer par une activité plus intense de l'amygdale (un centre des émotions dans le cerveau).

ce que nous recueillons sur les bandes-son enregistrées dans notre laboratoire : « Avec tes problèmes c'est mon problème, c'est ton problème, tu te démerdes. [silence] Si tu n'es pas content tu t'en vas ! [silence] Tu m'as presque menacé... [silence] Faut pas refaire ça, parce que je suis le maître chez moi. » Le dormeur prononce uniquement les mots qui sont les siens dans le rêve : lors d'un dialogue, il ne « joue » que son propre rôle et ne dit donc pas à haute voix la réponse de son interlocuteur.

Par moments, il effectue aussi toute une série de petits mouvements : les yeux bougent sous les paupières, les tympans subissent des secousses spontanées (comme si le sujet entendait), le pénis entre en érection, les doigts connaissent de brèves contractions, le visage affiche diverses expressions... Ces mouvements ne correspondent pas tous au contenu mental du dormeur : par exemple, l'érection du pénis est un automatisme sans lien avec le contenu des rêves et les secousses des nouveau-nés endormis sont commandées de façon inconsciente par le tronc cérébral. Mais certains, telles les mimiques faciales, sont bien la traduction corporelle du rêve : on le sait là encore grâce à leur concordance avec le récit du dormeur à son réveil.

Ainsi, il est possible de lire les émotions du rêveur sur son visage, où s'affiche parfois un sourire heureux ou un froncement particulier des sourcils exprimant la colère. Nous n'en avons tiré que peu

d'enseignements pour l'instant, car l'expression faciale du dormeur adulte commence tout juste à être étudiée, mais la piste est prometteuse. De même, en 2015, Thomas Andrillon, du CNRS, et ses collègues ont montré que lorsque les yeux bougent pendant le sommeil, le cerveau s'active comme s'il explorait une scène visuelle.

Petit glossaire de la nuit

Durant le sommeil, des cycles d'environ 2h30 se succèdent, parfois entrecoupés de microréveils. Chaque cycle est divisé en deux phases.

Le sommeil lent

Les neurones du cortex (la couche de surface du cerveau) s'activent à un rythme plus lent et sont davantage synchronisés que pendant l'éveil. Cette phase, la première du cycle, dure 1h30 en moyenne.

Le sommeil paradoxal

L'activité cérébrale ressemble plus à celle de l'éveil et les muscles sont paralysés (sauf ceux des yeux, des doigts et du visage). Cette phase dure 5 à 60 minutes.

Des mouvements qui traduisent le rêve

Dans les cas non pathologiques, les comportements restent limités à ces mimiques faciales, à la parole et aux petits mouvements. Mais ils deviennent beaucoup plus amples chez les victimes de deux maladies : les troubles comportementaux en sommeil paradoxal (TCSP), qui affectent des personnes de plus de 50 ans, et le somnambulisme.

Ce dernier, fréquent pendant l'enfance, persiste parfois à l'âge adulte. Le dormeur se redresse, les yeux ouverts, parle (souvent de façon confuse ou apeurée) et adopte divers comportements, mimant par exemple la réparation d'une voiture. Dans le cas des terreurs nocturnes (une forme de somnambulisme associée à des émotions particulièrement négatives), il hurle et cherche à s'échapper du lit.

Ces comportements résultent de divers facteurs, tels le stress et un profil génétique particulier. Ils surviennent pendant le sommeil lent. En revanche, les TCSP, comme leur nom l'indique, se produisent pendant

le sommeil paradoxal. Le plus souvent, les patients se bagarrent en dormant et frappent ou injurient des ennemis invisibles. Dans environ 20 % des cas, ils adoptent d'autres comportements qui ne sont pas agressifs : ils fument des cigarettes fictives, chantent, vendent et achètent des objets, mangent, boivent un café...

C'est d'autant plus étonnant qu'en temps normal, un groupe de neurones s'active et paralyse le corps (sauf le visage et les yeux) pendant le sommeil paradoxal, de sorte que la mobilité devrait y être encore plus difficile que lors du sommeil lent. Ces neurones inhibiteurs sont situés dans le locus subceruleus (en haut du tronc cérébral, la zone de l'encéphale qui se connecte à la moelle épinière). Les TCSP sont le signe que ces neurones ne fonctionnent plus correctement ; ils constituent souvent la première étape d'une pathologie neurodégénérative, telle la maladie de Parkinson, d'où l'importance de les détecter. Il est en outre essentiel de traiter les patients, car ils risquent de tomber du lit ou de se blesser, voire d'attaquer leur conjoint.

On comprend depuis moins de vingt ans les causes de ces rêves agités, dont le diagnostic et le traitement sont du ressort des laboratoires de sommeil et non de la psychiatrie. Trop souvent, les patients se dirigent vers un psychanalyste, qui ignore la cause neurologique des TCSP et tente de leur trouver une explication psychologique : nous avons parfois du mal à leur faire comprendre qu'ils n'ont pas d'agressivité « refoulée » expliquant la violence qu'ils manifestent pendant la nuit.

Tout le monde rêve

Bien que pénalisantes, ces maladies donnent aussi accès aux images mentales du dormeur. En effet, si on le réveille pendant qu'il se démène, il rapporte un rêve congruent aux comportements observés. Plusieurs avancées ont résulté de l'étude de ces derniers. Par exemple, nous pensons désormais que tout le monde rêve, même ceux qui n'en gardent pas le moindre souvenir (soit moins de 1 % de la population), car nos patients qui prétendaient ne jamais rêver s'agitaient toutes les nuits comme les autres.

Qu'ils soient vécus à haute voix, condensés sur le visage des dormeurs ou mimés avec tout le corps, les rêves sont donc parfois observables de l'extérieur, comme une singulière pièce de théâtre.

L'AUTEURE



Isabelle ARNULF est professeur de neurologie à l'université Pierre-et-Marie-Curie, chef du Service des pathologies du sommeil à l'Hôpital de la Pitié-Salpêtrière et chercheuse à l'Institut du cerveau et de la moelle épinière (Inserm U1127 ; CNRS UMR 7225), à Paris.

Mais les chercheurs sont-ils condamnés à n'en être que les spectateurs passifs ? Non, car depuis quelques années se développe une méthode qui leur permet de communiquer avec le rêveur et d'interagir avec lui.

D'habitude, nous ignorons que nous sommes en train de rêver. Quand nous nous en apercevons – ce qui est arrivé au moins une fois à presque tout le monde –, cela déclenche en général le réveil. Cependant, certaines personnes sont conscientes de rêver tout en restant endormies et parviennent même à diriger leurs rêves : elles font apparaître des personnages à volonté, interagissent avec eux, s'envolent face à des ennemis... Cette condition hybride s'appelle le « rêve lucide ».

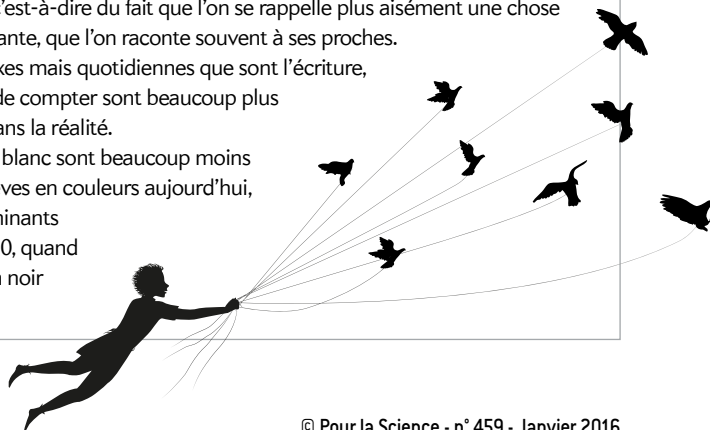
Deux niveaux de conscience coexistent chez le rêveur lucide : le premier lui permet de vivre son rêve (ressentir des émotions, courir, voler), tandis que le second, qualifié de conscience réflexive, lui fait réaliser que ce n'est pas réel. Les yeux ne sont jamais paralysés pendant le sommeil, de sorte que le rêveur lucide peut envoyer aux chercheurs un signal oculaire particulier (généralement regarder de gauche à droite deux ou trois fois de suite). Le dormeur exécute alors cette action à la fois physiquement et dans son rêve.

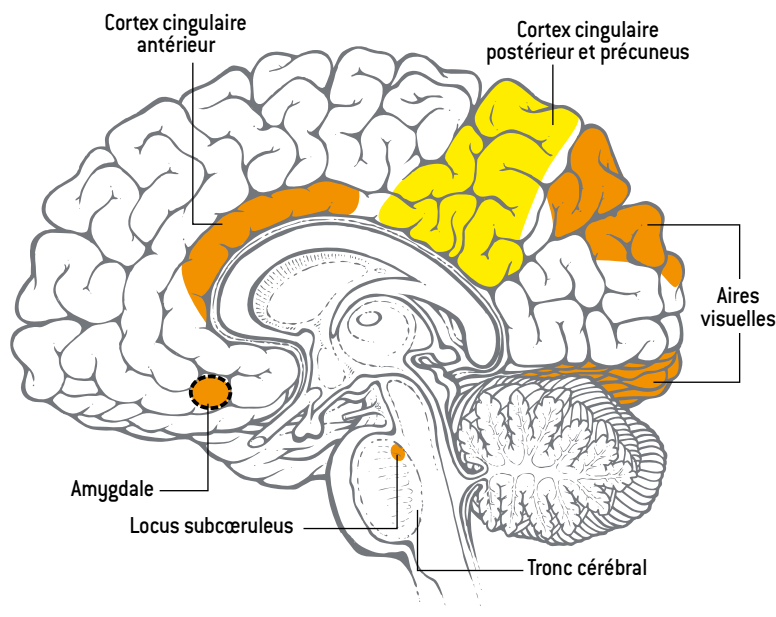
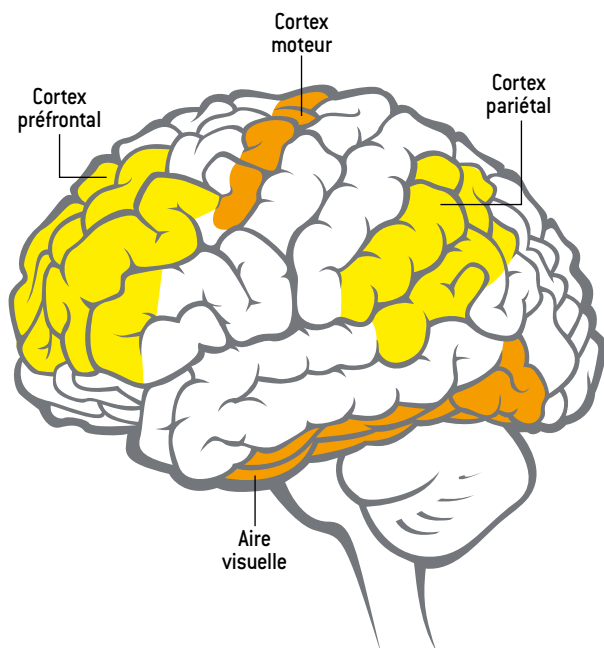
Que contiennent les rêves ?

De grandes banques de données recensent plusieurs dizaines de milliers de rêves. Elles renseignent sur les scénarios, les pensées et les émotions qui peuplent nos nuits. Voici quelques-uns de leurs enseignements.

- Les rêves contiennent en moyenne deux fois plus d'émotions négatives (peur, colère, honte) que d'émotions positives (joie, bonheur, plaisir).
- Le sexe y est rare : il n'est présent que dans 2 % des rêves des hommes et 0,5 % de ceux des femmes.
- Dans la majorité des cas, le contenu est ordinaire et met en scène le sujet dans son environnement habituel, parlant avec deux à quatre personnages.
- Les rêves dits « typiques » de perdre ses dents, d'être nu en public ou de voler ont été faits au moins une fois par quasiment tout le monde, mais ils représentent moins de 1 % de l'ensemble des rêves. Ils sont surtout typiques du biais de rappel, c'est-à-dire du fait que l'on se rappelle plus aisément une chose inhabituelle, marquante, que l'on raconte souvent à ses proches.
- Les actions complexes mais quotidiennes que sont l'écriture, la lecture ou le fait de compter sont beaucoup plus rares en rêve que dans la réalité.
- Les rêves en noir et blanc sont beaucoup moins fréquents que les rêves en couleurs aujourd'hui, mais ils étaient dominants dans les années 1950, quand la télévision était en noir et blanc.

© Shutterstock.com / Fena





CERTAINES ZONES CÉRÉBRALES sont inhabituellement peu actives pendant le sommeil paradoxal (*en jaune*). C'est le cas notamment du cortex préfrontal, responsable du sens critique et du raisonnement, ce qui expliquerait les événements farfelus survenant dans les rêves de cette phase. D'autres régions sont au contraire très actives (*en orange*), telles que les aires visuelles et le cortex moteur, d'où les multiples mou-

vements et images peuplant les songes. L'amygdale, un centre cérébral des émotions, est aussi souvent hyperactive et inspirerait la forte coloration émotionnelle de nombreux rêves. Pendant le sommeil lent, l'activité cérébrale n'a pour l'instant pas pu être corrélée au contenu des rêves. Lors du sommeil paradoxal, le locus subcœruleus, dans le tronc cérébral, paralyse en outre le corps – sauf dans certaines pathologies.

Grâce à ce petit « télégramme du pays des songes », les chercheurs repèrent les périodes conscientes et corréler en direct des mesures de l'activité cérébrale à des actions rêvées spécifiques, préalablement choisies. Ainsi, Martin Dressler, de l'université de Munich, a montré en 2011 que l'on utilise la même région cérébrale lorsqu'on bouge sa main droite en rêve, en imagination et dans la réalité. La recherche sur le rêve lucide n'en est qu'à ses débuts, mais elle fournit déjà des résultats fascinants : les neuroscientifiques ont par exemple mesuré l'écoulement du temps en rêve (*voir l'encadré page 33*)!

Enfin, si le dormeur ne se souvient jamais de ses rêves, s'il ne les extériorise pas et s'il n'arrive pas à les contrôler, il reste une dernière piste pour les connaître : aller les chercher directement dans son cerveau. En 2012, Tomoyasu Horikawa, de l'université de Kyoto, au Japon, et ses collègues ont créé un logiciel « décodeur de rêve », fondé sur l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf). Grâce à des mesures chez des sujets éveillés (à qui ils montraient des photographies) ou endormis (qui racontaient ensuite leur rêve), ils ont d'abord associé l'activation de zones particulières du cortex visuel à certaines catégories : telle zone s'activait pour toutes les femmes, telle autre pour toutes les voitures, etc. Ils ont ensuite réussi à prédire la catégorie d'objets vus

en rêve en fonction de l'activité neuronale révélée par l'imagerie, et ce avec un taux de réussite assez élevé : 55 % si le dormeur avait vu une image de nourriture et plus de 77 % si c'était un personnage. Pour la première fois, des chercheurs ont donc lu dans le cerveau endormi.

Ainsi, les neurosciences ont ouvert de multiples fenêtres sur les rêves, dont nous avons rassemblé d'immenses collections. Reste à interpréter ce formidable capharnaüm. Pourquoi rêve-t-on par exemple de voler dans les airs ou de manquer un examen (souvent la veille de le passer) ? Les chercheurs proposent plusieurs réponses. Non exclusives, d'ailleurs : la pensée humaine a de multiples fonctions – apprendre, se développer, prévoir, s'adapter –, pourquoi le rêve, qui occupe plus du quart de notre vie, n'en aurait-il qu'une ?

Simplement le bruit de la machine ?

À la question « quel est le sens des rêves ? », Alan Hobson, de l'université Harvard, a une réponse plutôt radicale : aucun. Pour lui, les rêves ne sont qu'une conséquence secondaire du fonctionnement nocturne du cerveau. Un « activateur » allumerait l'hippocampe, ainsi que les régions sensorielles et émotionnelles, qui formeraient alors des

images ou des sensations spontanées issues de notre mémoire. Cet activateur pourrait par exemple être le locus subcœruleus, la petite zone du tronc cérébral qui non seulement neutralise le tonus musculaire pendant le sommeil paradoxal, mais aussi déclenche les secousses des extrémités et fait bouger les yeux.

Certaines observations suggèrent effectivement que le tronc cérébral déclenche les premiers éléments du rêve. Elles concernent des patients victimes d'un syndrome neurologique rare : la perte d'autoactivation psychique, où plus aucune pensée spontanée ne vient à l'esprit pendant l'éveil. Nous avons constaté qu'ils ont tout de même des rêves, mais très courts et peu scénarisés : autrement dit, grâce peut-être à l'activateur du tronc cérébral, quelques images sont évoquées, mais pas plus car le reste du cerveau ne peut « broder » dessus.

Dans les cas non pathologiques, les histoires abracadabrantes des rêves ne seraient alors que des tentatives désordonnées du cerveau d'interpréter les éléments disparates allumés par le tronc cérébral. Le neurologue américain Howard Roffwarg résume ce point de vue en disant que « le rêve naît dans le tronc cérébral, puis est habillé par le reste du cerveau ».

Des éléments externes, tels qu'un bruit dans la pièce, seraient aussi parfois perçus



© Isabelle Arnulf

DANS CERTAINES PATHOLOGIES, LES PATIENTS S'AGITENT violemment pendant leur sommeil. Quand on les réveille, ils racontent un rêve concordant avec leur comportement. Il suffit donc d'observer ce dernier pour connaître le contenu des songes. Nombre de rêves

mettent en scène un danger mortel (ici, le dormeur lutte contre quelqu'un qui tente de l'étouffer), ce qui accrédite la théorie dite de « simulation de la menace » : nos rêves nous entraîneraient à affronter les dangers de la vie réelle.

et interprétés. En 1958, William Dement, de l'université Stanford, en Californie, a ainsi obtenu des rêves de pluie après avoir vaporisé un peu d'eau sur le visage de personnes endormies. À d'autres moments de la nuit, le cerveau se coupe presque totalement du monde extérieur, ce qui favorise sans doute les rêves dits vestibulaires (voler, sortir de son corps, se déplacer en nageant) : ne percevant plus l'information sensorielle liée à la pesanteur, le cerveau imaginerait des scénarios pour expliquer cette absence. Lors du sommeil paradoxal, à l'inverse, il créerait des rêves où fuir est impossible (par exemple parce que les pieds sont collés au sol) en sentant la paralysie – réelle – du corps.

Cependant, je n'adhère pas à la théorie déniait tout sens aux rêves. Si certaines catégories de rêves semblent bien se contenter de traduire les contraintes et les libertés imposées à la pensée pendant le sommeil, d'autres paraissent remplir un rôle. Ainsi, le fonctionnement du cerveau endormi pourrait avoir été en partie sélectionné au fil de l'évolution et procurer divers avantages. C'est la position de la majorité des chercheurs.

À la fin du XIX^e siècle, Sigmund Freud fut le premier scientifique à proposer un rôle pour les rêves : selon lui, ces derniers servent d'exutoire et expriment l'inconscient de la personne, notamment ses désirs refoulés pendant l'éveil. Le contenu manifeste du rêve ne correspondrait pas directement à ces désirs perturbants, car ceux-ci seraient masqués par une censure qui persisterait pendant le sommeil, d'où leur aspect étrange. Par la suite, la psychanalyse a généralisé cette hypothèse en supposant que les rêves

expriment des désirs non comblés dans la journée, conscients ou non. Freud supposait également que les terreurs nocturnes traduisent un traumatisme oublié.

Les théories freudiennes ont été énormément popularisées et beaucoup de patients y croient encore, alors qu'elles n'ont reçu aucune confirmation scientifique. Au contraire, plusieurs expériences

Finlande, a proposé une théorie novatrice, selon laquelle les rêves servent à simuler une situation dangereuse pour mieux l'affronter dans la réalité. Antti Revonsuo a en effet constaté que les attaques, les poursuites et les animaux dangereux y sont très fréquents. Les rêves des jeunes adultes comportent ainsi 60 à 77 % d'éléments de menace et ceux des chiens ou des chats, trahis par les mouvements qu'ils font dans leur sommeil, semblent emplies de chasses et de bagarres.

Selon la psychologue, cela permettrait d'entraîner nos stratégies de défense : fuir, contre-attaquer, s'adapter. Le rêve est sur ce point supérieur à l'imagination, car le dormeur croit vraiment vivre la situation, éprouve les mêmes émotions que dans la réalité et se déplace dans un univers à trois dimensions où tous les organes sensoriels et moteurs fonctionnent, quoique virtuellement. Par la suite, Antti Revonsuo a étendu sa théorie aux menaces sociales : l'exclusion d'un groupe, que l'on retrouve souvent dans les rêves, signifiait une mort certaine à des époques ancestrales.

L'étude menée en 2007 par Tore Nielsen, de l'université de Montréal, soutient la théorie de la simulation des dangers. Le psychologue a analysé les rêves de 200 jeunes mères après l'accouchement : 86 % concernaient leur bébé et 73 % le présentaient en danger (étouffé par mégarde dans le lit maternel ou tombant du berceau), conduisant souvent au réveil brusque de la mère.

Les troubles que nous filmions chaque nuit dans notre service des pathologies du sommeil accréditent aussi cette théorie : les

60%
des étudiants
ont rêvé
de leur concours la nuit
le précédant

exploitant les banques de rêves remettent en cause le rôle d'exutoire de ces derniers. En 1970, le neurologue Ismet Karacan a ainsi demandé à de jeunes adultes masculins de se priver de masturbation et de relations sexuelles pendant deux semaines afin de déterminer si la fréquence de leurs rêves érotiques augmentait : que nenni !

En 2000, le psychologue et philosophe Antti Revonsuo, de l'université de Turku, en

terreurs nocturnes mettent presque toutes en scène des menaces mortelles imminentes (plafond qui s'écroule, noyade, serpents), auxquelles le dormeur réagit en fuyant le lit, tandis que les cauchemars liés aux troubles comportementaux en sommeil paradoxal comportent surtout des agressions; le dormeur contre-attaque alors à violents coups de poings ou pied.

Les rêves ne servent-ils qu'à nous protéger d'une mort violente ou nous permettent-ils d'anticiper d'une façon plus générale? C'est ce que nous avons testé en 2013. Nous nous sommes penchés sur le cas d'étudiants qui, le lendemain, passaient le – difficile – concours de première année de médecine, à l'université Pierre-et-Marie-Curie. Quelque 60 % d'entre eux ont rêvé du concours et, en majorité (78 %), de façon négative: panne de réveil, arrivée en retard, oubli de la carte d'étudiant, incapacité à

trouver la réponse... L'un d'eux a même rêvé qu'il devait rédiger son devoir sur de la mie de pain!

Ce type d'anticipations plus ou moins fantaisistes incorpore parfois des éléments perçus inconsciemment dans la journée et met en scène des associations et des déductions inédites. Les rêves sont donc une formidable machine à élaborer des scénarios. Et cette machine fonctionne plusieurs heures par nuit! Cela expliquerait qu'un grand nombre de gens ont parfois l'impression de réaliser un rêve prémonitoire: des centaines de scénarios imaginaires se déroulant chaque nuit dans nos têtes, la probabilité que l'un d'eux survienne effectivement le lendemain est non négligeable.

De façon intéressante, chez nos étudiants, les rêves d'échec ont été une mauvaise prédiction mais un bon présage, puisque ceux qui les avaient faits ont mieux

réussi que les autres: ils ont obtenu en moyenne un demi-point supplémentaire, ce qui correspond à un bond de cent places dans le classement.

Il semble donc que le cerveau dramatise le quotidien de chacun pendant le sommeil et que ces scénarios catastrophe lui procurent un gain cognitif. En jouant mentalement les événements à l'avance, il apprendrait à éviter les pires comportements et à garder les meilleurs. Gageons que les candidats ayant oublié leur carte d'étudiant en rêve ont bien vérifié qu'elle était dans leur portefeuille avant de partir à l'examen!

Cette dramatisation nous entraînerait en outre à gérer les émotions négatives. Quel acteur n'a pas rêvé qu'il faisait un four la veille d'une première? Il sera un peu moins stressé le lendemain pour avoir déjà vécu la représentation en rêve.

Le temps du rêve

Une croyance erronée et répandue rapporte que nous créerions les rêves instantanément au réveil. Cela supposerait une condensation fulgurante du temps: nous aurions l'impression de vivre un long rêve alors que moins d'une minute s'écoule en réalité. Mais de nombreuses études ont montré que le rêve est bien construit pendant le sommeil et que le temps s'y écoule – presque – comme celui de l'éveil.

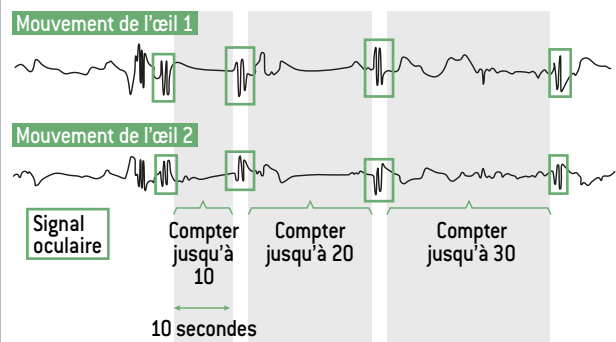
En 1958, William Dement a ainsi utilisé des jalons sensoriels: il a exposé des dormeurs à des sons (des sonneries de porte) et des lumières (des flashes de lampe), puis les a réveillés 10 minutes après. Un quart des rêves recueillis avaient incorporé le son ou la lumière dans leur scénario, les dormeurs rapportant par exemple que « des amis ont sonné à la porte ». Et surtout, la longueur du scénario rêvé à partir de cet indice et jusqu'au réveil 10 minutes plus tard correspondait à la durée qu'il aurait approximativement eue dans la réalité: « Des amis ont sonné à la porte; je leur ai préparé du thé. Nous discutons tranquillement en le buvant quand vous m'avez réveillé. »

Une autre méthode pour mesurer le temps du rêve se fonde sur les pathologies où les dormeurs extériorisent leurs rêves. Les patients effectuent en effet les mêmes gestes que dans la réalité, et dans le même temps: le fumeur porte calmement sa cigarette fictive à sa bouche, inspire longuement, expire doucement puis la tapote et l'écrase dans un cendrier invisible; l'ancien menuisier qui construit un escalier tape avec son marteau pendant une heure de sommeil paradoxal, sans « court-circuit temporel »...

Enfin, en 2014, Daniel Erlacher, de l'université de Bern, en Suisse, a travaillé avec des rêveurs lucides (qui sont conscients de rêver et savent effectuer des actions délibérées dans leur rêve). Il les a fait

compter jusqu'à 10, 20 et 30 pendant l'éveil, puis en rêve. Il leur a aussi demandé de marcher 10, 20 et 30 pas et de réaliser 10, 20 et 30 accroupissements successifs dans les deux circonstances. Pendant son sommeil, le rêveur lucide signalait le début et la fin de chaque action par des signaux oculaires, ce qui permettait d'en calculer la durée. Celle-ci était un peu plus longue en rêve qu'en réalité, la différence la plus remarquable portant sur les actions physiques

(la marche et l'accroupissement). Par exemple, compter jusqu'à 20 prenait en moyenne 17 secondes en éveil et 22,4 secondes en rêve lucide. Marcher 30 pas prenait 18,5 secondes en éveil et 28,6 secondes en rêve lucide. Notons que le temps relatif était conservé pendant le rêve: marcher 30 pas durait 3 fois plus de temps que marcher 10 pas. Globalement, le temps du rêve n'est donc pas si différent de celui de l'éveil.



COMPTER JUSQU'À 10 EN RÊVE prend en moyenne 11,1 secondes, contre 8,9 lorsque nous sommes réveillés. C'est ce qu'a montré une expérience où des rêveurs dits lucides (car ils sont capables de contrôler leurs rêves) ont signalé les moments où ils commençaient et arrêtaient de compter par un code oculaire (deux allers-retours des yeux, mesurés par des capteurs).

Le rêve est particulièrement riche en émotions négatives quand il survient pendant le sommeil paradoxal, phase où l'amygdale (un centre des émotions dans le cerveau) est très active. Tore Nielsen et Ross Levin, de l'université de Montréal, proposent que la configuration particulière du cerveau lors de cette phase lui permette de s'habituer plus facilement aux images et aux émotions en les jouant « à vide ». En effet, des systèmes cérébraux essentiels pour l'humeur et les réactions de fuite ou de défense sont inactifs : les images émouvantes ne les mobiliseront donc pas. En outre, l'hippocampe (siège de la mémoire à court terme) dialoguerait avec l'amygdale, ce qui rendrait les frayeurs ou les difficultés de la veille plus « digestes » en les associant avec d'autres éléments à mémoriser, plus neutres et sans forcément de rapport. Ce serait la source de certaines associations bizarres se produisant dans les rêves.

Un tel entraînement émotionnel serait plus généralement une fonction du sommeil : « Le plus court chemin entre le désespoir et l'espoir est une bonne nuit de sommeil », stipule un proverbe populaire. En 2011,

Matthew Walker, de l'université de Berkeley, en Californie, a présenté des images horribles (scènes de guerre ou de meurtre) à des sujets et montré que leur amygdale s'active d'abord fortement, puis quasiment plus lors d'une deuxième présentation après une nuit de sommeil. Les images étaient pourtant parfaitement mémorisées, signe que le cerveau gardait l'information de façon moins émotionnelle, mais plus efficace. L'activité de l'amygdale était d'autant plus éteinte que le lobe préfrontal (une zone située à l'avant du cerveau et responsable du raisonnement et de la maîtrise de soi) s'était activé pendant le sommeil paradoxal, comme si le dialogue entre l'émotion et la raison qui s'y était déroulé avait durablement modifié leurs rapports, pour le plus grand bien du dormeur.

Consolider la mémoire

Une autre théorie stipule que les rêves améliorent la mémorisation des événements de la veille, dont ils joueraient une version remodelée. De nombreuses expériences montrent que le fait de dormir après un apprentissage

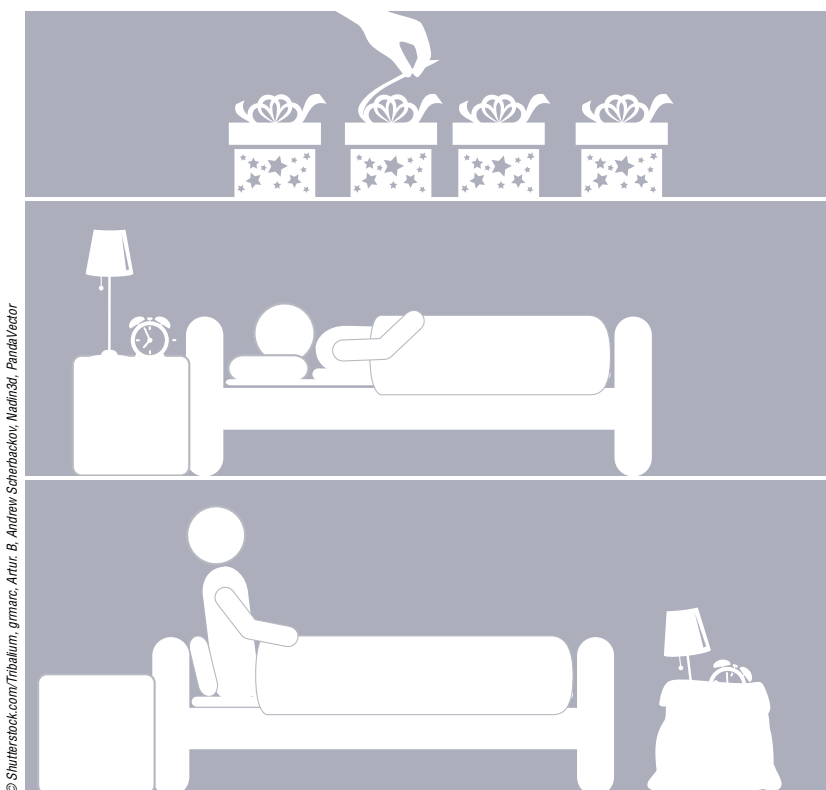
(d'un nouvel air de piano, d'une récitation, de l'emplacement d'un restaurant) améliore les performances, davantage qu'une période d'éveil de durée équivalente. La séquence de piano, par exemple, est mieux jouée, avec moins de fautes et plus vite. Le gain de performance est de l'ordre de 20 %, que ce soit après une sieste un peu longue (d'environ une heure et demie) ou une nuit complète. En outre, les régions cérébrales (et même les neurones précis) qui ont travaillé lors de l'apprentissage se réactivent pendant le sommeil ; et le lendemain, la performance est d'autant meilleure que cette réactivation était intense.

Cela signifie-t-il que la tâche apprise disparaît dans le contenu du rêve lui-même ? Il semble que ce soit souvent le cas. Plusieurs études ont révélé de nombreuses ressemblances entre les éléments du rêve (lieu, objets, personnes) et les événements vécus pendant la journée. En 2003, Magdalena Fosse, de l'école de médecine Harvard, et ses collègues ont par exemple demandé à des sujets de noter et de comparer leurs rêves et leurs activités journalières pendant deux semaines : plus de la moitié des thèmes, des émotions et des personnages rêvés étaient en lien avec les événements vécus récemment.

Il s'agissait rarement d'une répétition exacte des faits, qui étaient plutôt incorporés dans d'autres scénarios. Cela suggère que ce que nous apprenons le jour est intégré, non pas comme une copie conforme, mais par fragments, comme une (re)construction par briques, dans notre cerveau rêvant.

La consolidation des souvenirs est particulièrement intense pendant le sommeil lent. Diverses régions cérébrales s'allument alors en alternance, d'autant plus souvent et plus intensément qu'elles ont travaillé dans la journée. Ainsi, quand un rat apprend à retrouver son chemin dans un labyrinthe, les mêmes neurones (nommés neurones de lieu) s'activent pendant l'éveil et lors du sommeil lent qui suit. Est-ce le signe que le rat rêve de son labyrinthe ? Peut-être, mais difficile de lui demander la confirmation...

Des travaux publiés en 2010 par Robert Stickgold, de l'université Harvard, confirment en tout cas qu'un apprentissage est d'autant plus efficace que nous en rêvons par la suite. Dans cette étude, des étudiants se sont initiés à un jeu vidéo de labyrinthe, puis ont effectué une sieste de 45 minutes : ceux qui ont eu des rêves en lien avec la tâche apprise étaient ensuite trois fois plus



APRÈS AVOIR EMBALLÉ DES PAQUETS DE NOËL toute la journée, une patiente somnambule a emballé tous les objets de sa table de nuit dans sa housse de couette en dormant. Ainsi, pendant notre sommeil, et notamment dans les rêves, nous jouons une version remodelée des événements vécus récemment. Les rêves permettraient alors de consolider les apprentissages.

performants que les autres, même quand le lien n'était que parcellaire (certains avaient juste entendu la musique du jeu).

Nos résultats sur les pathologies du sommeil fournissent aussi quelques éléments étayant cette théorie. Par exemple, nous avons enseigné à des somnambules une chorégraphie des mains, qu'une patiente a partiellement répétée en dormant, signe qu'elle en rêvait. Elle l'a bien mieux réalisée le lendemain.

Le fait que les événements vécus ne soient pas rejoués à l'identique, mais passés à la moulinette cérébrale accroît également la créativité, les rêves favorisant les idées et les associations inédites. Plusieurs études ont montré que nous trouvons plus facilement la solution d'un problème en « dormant dessus ». Dans l'une d'elles, réalisée en 2004, Ullrich Wagner, de l'université de Lübeck, en Allemagne, a présenté une épreuve issue d'un test d'intelligence à des étudiants. Ceux qui dormirent ensuite furent deux fois plus nombreux à en découvrir la règle. Et nombre d'anecdotes suggèrent que la créativité et les associations d'images propres au sommeil transparaissent dans le rêve : par exemple, au XIX^e siècle, le chimiste allemand August Kekulé aurait découvert la structure cyclique du benzène en rêvant d'un serpent qui tourne à l'intérieur de la molécule et le chimiste russe Dmitri Mendeleïev, auteur du célèbre tableau périodique des éléments, a déclaré : « J'ai vu dans un rêve un tableau où tous les éléments tombaient à la bonne place. »

Se mettre à la place des autres

Enfin, le rêve aurait une fonction sociale. Qui n'a jamais été le héros nocturne du film vu avant d'aller au lit ? Quelle femme n'a pas été une fois un homme en rêve ? Point d'homosexualité refoulée ici, malgré ce qu'explique la psychanalyse : il semble plutôt s'agir d'un exercice de notre capacité à nous mettre à la place des autres, qui inclut l'empathie (le partage des émotions). Cette capacité est fondamentale pour la vie sociale. Elle se développe vers l'âge de quatre ans grâce à des neurones dits « miroirs », qui s'activent de la même façon quand nous exécutons une action et quand nous voyons un congénère la réaliser. Notre cerveau « joue » alors mentalement cette action en miroir.

Et quand nous nous plaçons dans la peau d'un autre en rêve, nous y croyons

encore plus que pendant l'éveil. Le drôle de rêve que m'a raconté Pierre, un patient incapable d'aider son épouse enceinte, car il était bloqué dans un lit d'hôpital, en est une belle illustration : privé de bras et de jambes, il ne pouvait rien faire, puis soudain il a accouché en rêve et tout allait mieux.

Nous avons alors supposé que le rêve entraîne à comprendre les autres et à partager leurs émotions *via* la réactivation des neurones miroirs. Selon nous, c'est ce qui s'est produit chez des paraplégiques de naissance que nous avons étudiés : tous marchaient en rêve, dansaient, couraient, pédalaient, jardaient ou tapaient dans un ballon. Alors qu'ils n'avaient jamais effectué ces actions, ils étaient capables de les réaliser en rêve, sans effort mental, probablement parce qu'ils les avaient vu exécuter par des personnes valides autour d'eux. Là encore, le rêve semble plus puissant que l'imagination pour simuler un phénomène de façon réaliste, puisque nous y croyons plus et que nous sommes plongés dans un mélange complet de sons, de sensations, d'images et d'émotions.

Alors, d'où viennent les rêves ? Les neurosciences cognitives, combinées à l'immense richesse de l'observation clinique en médecine du sommeil, donnent quelques réponses. Cette activité nocturne singulière semble avoir été en partie sélectionnée au fil de l'évolution pour accomplir diverses fonctions : simuler les menaces, anticiper, mémoriser, gérer les émotions négatives, consolider la mémoire, produire des idées nouvelles et faciliter la vie en société. Mais les nombreux éléments disparates qui s'assemblent au sein des rêves n'ont peut-être pas tous un rôle et certains pourraient juste traduire les contraintes pesant sur le fonctionnement mental pendant le sommeil, ainsi que certaines perceptions extérieures.

Les rêves dits « typiques » (voler, être nu en public, perdre ses dents) illustrent bien ces origines multiples. Dans ceux où l'on vole, le cerveau tenterait d'interpréter l'abolition de la sensation de pesanteur. Ceux où l'on est nu résulteraient de la perception temporaire du fait d'être réellement nu (ou en tout cas moins habillé que d'habitude) dans son lit. Quant à ceux où l'on perd ses dents, il s'agirait de souvenirs anciens qui sont réactivés, sous une forme un peu déformée. Pas étonnant, avec cette diversité d'origines et de fonctions, que les rêves soient d'une telle exubérante variété ! ■

2 fois plus de personnes parviennent à résoudre un test d'intelligence après avoir dormi

■ BIBLIOGRAPHIE

T. Andrillon *et al.*, **Single-neuron activity and eye movement during human REM sleep and awake vision**, *Nature Communications*, vol. 6, pp. 1-10, 2015.

I. Arnulf, **Une fenêtre sur les rêves**, Odile Jacob, 2014.

I. Arnulf *et al.*, **Will students pass a competitive exam that they failed in their dreams ?**, *Consciousness and Cognition*, vol. 29, pp. 36-47, 2014.

T. Horikawa *et al.*, **Neural decoding of visual imagery during sleep**, *Science*, vol. 340, pp. 639-642, 2013.

Un océan dans une flûte de champagne

Gérard Liger-Belair, Clara Cilindre, Fabien Beaumont et Guillaume Polidori

Les effets de condensation observés lors du débouchage d'une bouteille de champagne et les mouvements tourbillonnaires imprimés au liquide par la remontée des bulles rappellent certains phénomènes atmosphériques ou océanographiques.

Au cours des dernières décennies, la science des bulles et des mousses s'est considérablement développée. Physiciens, chimistes et mathématiciens se sont passionnés pour ces objets fragiles aux propriétés extraordinaires. Cependant, et à notre grande surprise, les processus liés à la formation des bulles dans un vin de Champagne sont restés jusqu'à peu totalement inexplorés. Or le champagne permet aux scientifiques d'entreprendre un périple dans le monde fascinant des bulles, des gaz dissous, des changements de phase et des fluides en mouvement.

De nombreux savoirs ont été ainsi acquis, sans épuiser toutes les questions posées. Ici, nous nous limiterons à présenter quelques-uns des phénomènes qui accompagnent une dégustation de champagne, mais qui se retrouvent aussi à de tout autres échelles, en particulier celles de l'atmosphère et de l'océan.

Le débouchage d'une bouteille à l'étude

Intéressons-nous par exemple à ce qui se passe lorsqu'on débouche une bouteille de champagne. Avant cette opération, l'air enfermé dans la bouteille est sous pression. En effet, à la suite d'une seconde fermentation alcoolique en bouteille close (on l'appelle la prise de mousse), les vins de Champagne et les vins effervescents élaborés selon la

L'ESSENTIEL

- Le champagne et sa dégustation font l'objet depuis quelques années d'études scientifiques détaillées.
- L'imagerie ultrarapide permet d'analyser les processus de condensation à l'œuvre lors du débouchage d'une bouteille.
- La tomographie laser révèle les mouvements tourbillonnaires du vin créés par la remontée des bulles.
- Les phénomènes observés ressemblent à ceux qui animent l'atmosphère et les océans.

Université de Reims Champagne-Ardenne