

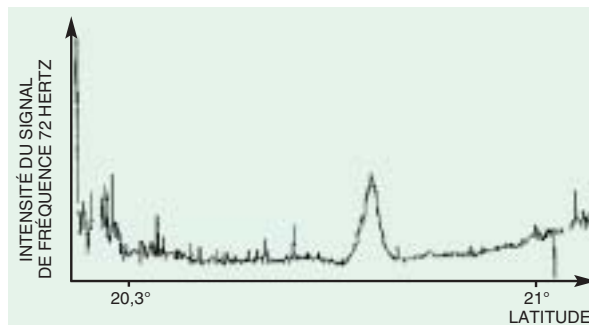
Depuis la mise en évidence de ces ondes, deux théories s'affrontent pour les expliquer. Selon la première, les ondes sont produites par les faibles déplacements de la roche avant les séismes. Plusieurs expériences ont montré que, soumis à des contraintes mécaniques, le granit constitutif des continents émet des ondes radio. Ces dernières seraient engendrées, par exemple, par la roche elle-même à l'hypocentre du séisme par effet piézo-électrique (la piézo-électricité est l'apparition de charges électriques sur les faces de certains matériaux comprimés ou étirés).

Dans le second scénario, l'activité sismique n'est pas à l'origine des ondes, mais elle modifierait les ondes présentes dans l'ionosphère (la plus haute couche de l'atmosphère) : les charges électriques produites à la surface terrestre par les séismes modifieraient la propagation des ondes issues de la rencontre du vent solaire – un flux de particules chargées émis par le Soleil – avec le champ magnétique terrestre. Il pourrait aussi s'agir de nos propres ondes radio, qui interagissent également avec l'ionosphère : elles parcourent de longues distances autour de la Terre grâce à leurs rebonds du sol sur l'ionosphère, à nouveau sur le sol, et ainsi de suite. Une perturbation de l'ionosphère précédant un séisme modifierait ces émissions.

Dans les deux cas, l'ionosphère est fortement mise en cause. Pour tester cette hypothèse, Michel Parrot, du Laboratoire de physique et chimie de l'environnement d'Orléans, a passé au crible l'influence de centaines de séismes sur les signaux captés par des satellites. Les satellites susceptibles d'être sensibles aux perturbations ionosphériques sont ceux qui étudient les ondes dues au vent solaire, et les satellites GPS, dont le signal est influencé par le degré d'ionisation de la couche supérieure de l'atmosphère. L'analyse de ces signaux montre que l'ionosphère est effectivement altérée lors des séismes. Malheureusement les statistiques sont encore insuffisantes pour préciser les résultats, notamment parce que tous les séismes

ne donnent pas de signal. On ne peut pas adapter facilement les satellites actuels à ce type d'étude, de sorte que l'on n'a pu confirmer le fait que les perturbations électromagnétiques se produisent avant les séismes.

Toutefois, l'observation de l'ionosphère est riche de promesses. S'il se confirme que les perturbations précèdent les événements sismiques, leur observation ouvrira la voie à une prédiction à l'échelle de la planète – contrairement aux mesures au sol qui restent, par essence, ponctuelles. Un satellite spécialement dédié à l'enregistrement des perturbations des émissions électromagnétiques, DEMETER (détection des émissions électromagnétiques transmises des régions à séismes), sera lancé en 2004. Le chemin sera long avant que l'on ne sache prévoir la localisation, la magnitude et la date des séismes, mais la prévision de ces cataclysmes ne relève plus de l'utopie.



Trois heures après un séisme survenu en Iran, le satellite AUREOL-3 a capté un signal radio (le pic au centre de la courbe) émergeant du bruit ambiant (les signaux en fin de courbe ne sont pas significatifs). Sur Terre, de telles perturbations du signal radio ont été détectées plusieurs heures avant certains séismes.

Pas de coup d'État chez les fourmis

Chez certaines fourmis sans reine, les ouvrières s'interposent entre la reproductrice et ses remplaçantes, diminuant ainsi les conflits au sein de la colonie et améliorant son fonctionnement.

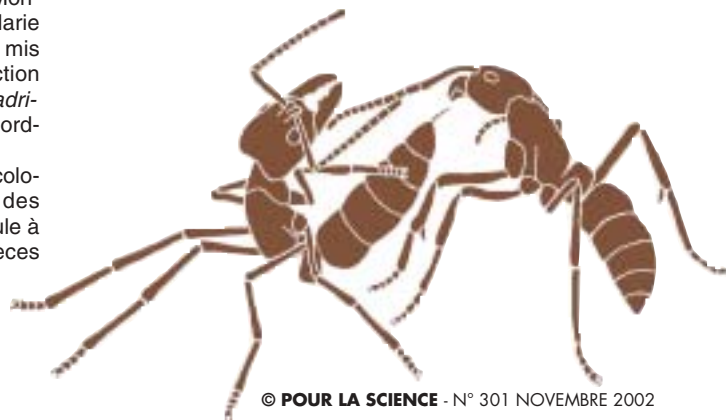
En 1533, Catherine de Médicis épouse le futur Henri II et semble promise à un bel avenir de reine. Toutefois, pendant le règne de son mari, elle laissera, bien malgré elle, Diane de Poitiers, la favorite, régner sur le roi. De cette relation illégitime naquit, selon Brantôme, une fille, Diane de Valois. Si l'Italienne, qui eut dix enfants dont trois régnèrent, ne put contrecarrer sa rivale, il en va différemment dans les colonies de fourmis... sans reine. Thibaud Monnin, du Laboratoire d'écologie de l'Université Pierre et Marie Curie, et ses collègues de l'Université de Sheffield ont mis en évidence les mécanismes qui régissent la reproduction au sein de colonies de fourmis géantes, *Dinoponera quadriceps* (elles atteignent trois centimètres de longueur), du Nord-Est du Brésil.

La majorité des 10 000 espèces de fourmis vivent en colonies et ont une reine qui diffère morphologiquement des ouvrières : plus grande et pourvue d'ailes, elle est la seule à pouvoir se reproduire. Cependant, une centaine d'espèces de fourmis, dont *Dinoponera quadriceps*, constituent des colonies qui n'ont jamais de reine. Toutes les ouvrières sont aptes à se reproduire, pourtant dans chaque colo-

nie une seule se reproduit. Il en résulte des conflits pour déterminer laquelle, parmi les quelque 80 ouvrières formant une colonie de *Dinoponera quadriceps*, aura ce privilège. De ces conflits naît une hiérarchie : l'ouvrière la plus agressive, nommée *alpha*, est celle qui se reproduit ; puis, aux rangs immédiatement inférieurs, les ouvrières *bêta*, *gamma* et *delta*, dites de haut rang, sont des reproductrices potentielles, prêtes à prendre la place d'*alpha*. Enfin, dans le bas de l'échelle, les ouvrières de bas rang n'ont aucune chance de devenir *alpha* et travaillent au bon fonctionnement de la colonie.

Les mâles restent peu de temps dans la colonie. Dès qu'ils sont sexuellement matures, après deux ou trois semaines, ils quittent le nid en quête d'une colonie dont la femelle *alpha* est sexuellement réceptive.

Lorsqu'une ouvrière de haut rang défie la fourmi *alpha*, cette dernière replie son abdomen sous elle et projette par son aiguillon une phéromone (un messenger chimique) sur la prétendante.



Les ouvrières de bas rang détectent ce marquage chimique et attaquent la prétendante : elles saisissent ses pattes et ses antennes et l'immobilisent pendant plusieurs heures, voire plusieurs jours, jusqu'à ce qu'elle abandonne toute velléité de pouvoir. Seule la fourmi *alpha* produit cette phéromone qui, selon les biologistes, serait un signal de l'état physiologique de la fourmi *alpha*. Grâce à cette alliance avec les ouvrières de bas rang, la fourmi *alpha* conserve sa position dominante sans avoir à se battre, et diminue les tentatives de «coup d'État» de la part des ouvrières de haut rang. Les ouvrières de bas rang ont ainsi un rôle d'interposition, essentiel au bon fonctionnement des colonies. Elles stabilisent la hiérarchie de dominance. Toutefois, les ouvrières de bas rang répondent parfois à la phéromone en attaquant la fourmi *alpha* émettrice, probablement parce qu'elle est devenue trop vieille et que la colonie a besoin d'une jeune reproductrice. La composition de la phéromone varierait vraisemblablement au cours de la vie et serait un indicateur de sa vigueur.



Dans une colonie de fourmis *Dinoptera quadriceps*, seule l'ouvrière la plus agressive, nommée *alpha*, s'accouple. Certaines ouvrières dominantes la défient parfois pour prendre sa place. Lors de l'affrontement (page 18), la reproductrice ramène son abdomen vers l'avant afin de projeter à l'aide de son aiguillon des phéromones sur la prétendante. Les ouvrières immobilisent la prétendante (ci-dessus, le numéro 14) jusqu'à ce qu'elle renonce à son «coup d'État».

Le rideau du sommeil

Lorsqu'on s'endort, des circuits neuronaux entrent en oscillation. Ceci crée un filtre qui retient les informations sensorielles et pourrait les empêcher d'accéder à la conscience.

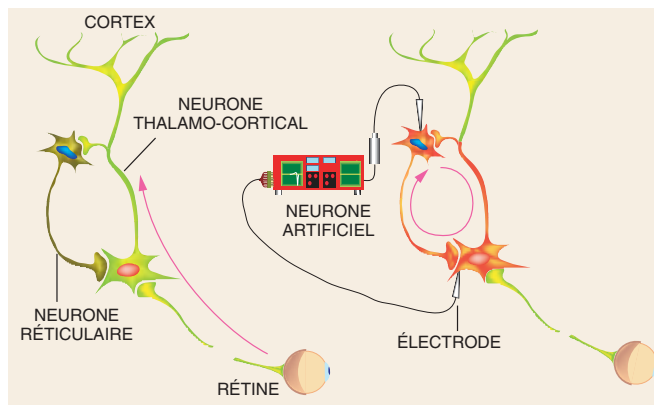
Nous perdons tous conscience une fois par jour : lorsque nous nous endormons. Les sons et les images cessent de parvenir à notre conscience. Au réveil, le contact avec les sensations extérieures revient. Tout se passe comme si le cerveau tirait un rideau sur le monde. Gwendal Le Masson, de l'Unité INSERM EPI 9914, à Bordeaux, et Thierry Bal et Damien Debay à l'Unité de neurosciences intégratives et computationnelles de Gif-sur-Yvette, ont montré que cette capacité de retranchement dépend de boucles de rétroaction électriques entre paires de neurones. Sur des tranches de cerveau de furet, ils ont remplacé un des neurones de la paire par un neurone électronique, et ont pu maîtriser le degré de «sommeil» de cette portion de cerveau.

L'électroencéphalogramme d'une personne éveillée révèle des ondes électriques de faible amplitude, désordonnées et de haute fréquence. Au contraire, au cours des phases de sommeil sans rêve, ou sommeil profond, l'électroencéphalogramme montre des ondes de grande amplitude et de basse fréquence. Ces ondes sont la résultante du battement synchrone de milliards de neurones, rythmés par un centre enfoui de l'encéphale. Dans cette phase, les zones du cortex sont isolées, en partie déconnectées du monde extérieur. Si l'on parle à la personne, elle ne répond pas. Si on lui montre une image, elle ne la voit pas.

Les cerveaux de furet sont le siège d'ondes lentes même une fois prélevés, à condition qu'on les immerge dans du liquide physiologique. Si on coupe le cerveau en tranches, les neurones continuent à fonctionner. On peut dès lors y placer des électrodes et étudier leur activité électrique. On constate qu'ils sont disposés en boucle : les neurones, dits thalamo-corticaux, ont leur corps cellulaire dans le thalamus, et leur extrémité dans le cortex. Une autre classe de neurones se connectent aux premiers au sein d'une zone nommée le noyau réticulaire, puis reviennent au thalamus. Ainsi, dans cette boucle, un neurone du thalamus reçoit un signal de sa propre activité par l'intermédiaire d'un neurone réticulaire. Dans une telle paire de

neurones, le neurone réticulaire est inhibiteur : il diminue l'activité électrique du neurone thalamo-cortical. L'intensité de cette inhibition peut varier, et les biologistes supposent que le moment où le cerveau bascule d'un régime d'éveil à un régime de sommeil dépend précisément de cette inhibition. Pour vérifier cette hypothèse, ils ont remplacé le neurone réticulaire d'une paire par un neurone électronique relié à un ordinateur, réalisé au CNRS de Bordeaux par Sylvie Renaud. Un tel neurone est beaucoup plus grand qu'un neurone biologique, puisqu'il est constitué de fils, d'électrodes, de cartes à puce et d'écrans. Toutefois, ses extrémités sont tout aussi petites et son fonctionnement aussi rapide. Les extrémités sont des électrodes qui plongent dans le corps du neurone biologique et lui injectent des courants électriques, exactement comme une synapse suscite des courants électriques grâce à des neurotransmetteurs.

Ce neurone est programmable par l'expérimentateur qui peut moduler l'intensité de son action inhibitrice. Ainsi, les biologistes ont observé que, si le pouvoir inhibiteur du neurone réticulaire sur le neurone thalamique est faible, le neurone thalamique parvient à transmettre des informations sensorielles, par exemple apportées par les neurones en provenance de la rétine, vers le cortex. En revanche, si le pouvoir inhibiteur du



Un neurone thalamo-cortical est connecté à un neurone réticulaire. Si le pouvoir inhibiteur du neurone réticulaire est faible, les informations passent de la rétine au cortex (à gauche). Si le pouvoir inhibiteur est fort, les influx nerveux circulent en boucle, et l'information n'est pas acheminée vers le cortex (à droite). Cette inhibition est modulable grâce à des neurones artificiels, qui peuvent renforcer ou réduire le pouvoir inhibiteur des neurones réticulaires. Le sommeil est caractérisé par des pulsations régulières en boucle de vastes populations de neurones.

neurone réticulaire est important, l'activité électrique des deux neurones se met à osciller en boucle, de façon autonome : l'information est en permanence réinjectée dans le neurone thalamo-cortical au lieu d'être acheminée vers le cortex.

Cette oscillation a un fondement moléculaire. Sous l'influence inhibitrice du neurone réticulaire, la membrane du neurone thalamique s'hypermolarise, c'est-à-dire que la différence de potentiel qui règne de part et d'autre de la membrane neuronale augmente, freinant les décharges électriques. Ce phénomène active une classe de canaux ioniques, les canaux de calcium à bas seuil, ce qui donne naissance à une onde de dépolarisation. Cette onde repart vers le neurone réticulaire, à nouveau mis à contribution : le processus se répète de façon cyclique, ce qui produit des oscillations dont la fréquence est analogue à celle du sommeil.

Peut-on extrapoler à l'animal ces résultats obtenus sur des coupes de cerveau ? Effectivement, on sait que chez des

chats endormis, l'activité des neurones thalamiques et réticulaires oscille, elle aussi, en boucle. De plus, le réseau hybride peut être tiré de son « sommeil », soit par un fort influx nerveux en provenance de la rétine (l'équivalent d'une lumière aveuglante réveillant le dormeur), soit par de la noradrénaline, une hormone de l'éveil. Ainsi, les neurones artificiels reproduisent assez bien les caractéristiques des réseaux réels.

Dans certaines situations, des groupes de neurones entrent en résonance (fonctionnent en boucle), pendant que d'autres continuent à transmettre les informations sensorielles au cortex. Ce filtre pourrait aider à se concentrer sur une modalité sensorielle particulière. Certains musiciens, quand ils se concentrent intensément sur les sons qu'ils produisent, disent percevoir le monde visuel avec moins d'intensité, de façon floue. Grâce aux nouvelles méthodes d'exploration du cerveau, mêlant biologie et électronique, on espère progresser dans la compréhension de ces phénomènes.

Le palimpseste cosmique

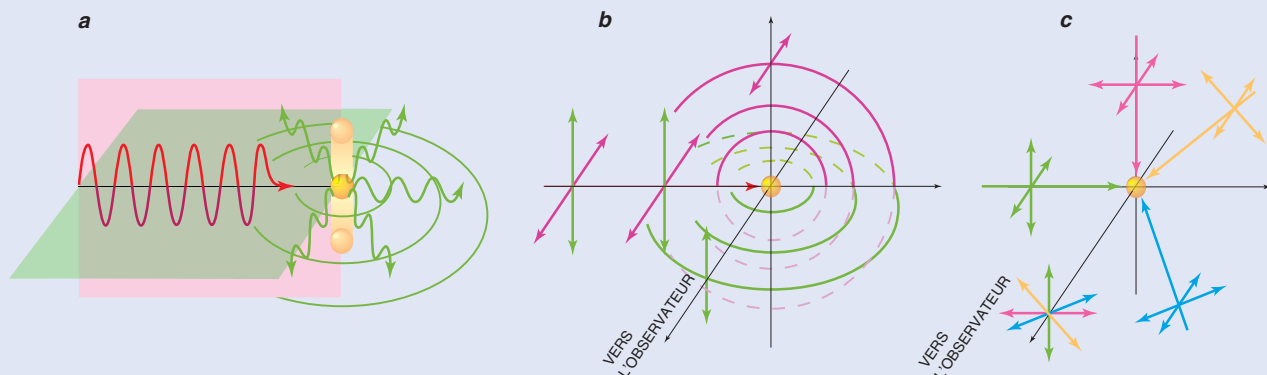
Aux informations gravées dans le rayonnement cosmologique fossile et déjà connues – son spectre et ses fluctuations –, s'ajoute sa polarisation, dont la mesure apporte de nouvelles informations sur l'Univers primordial.

Lorsque, 300 000 ans après le Big Bang, le plasma chaud et indifférencié qui emplissait l'Univers s'est refroidi au-dessous de quelques milliers de kelvins, il s'est transformé en gaz neutre. Il a libéré le rayonnement qu'il enfermait et qui nous parvient aujourd'hui sous la forme de micro-ondes. Ainsi, de la Terre, le fond du ciel constitue une coquille sphérique d'environ 14 milliards d'années-lumière de diamètre brillant dans le domaine des micro-ondes et que les astronomes nomment surface de dernière diffusion. Elle porte l'image du plasma primordial, tel qu'il était à cette époque reculée. Récemment, en employant un radiotélescope installé en Antarctique, les astronomes du DASI (pour *Degree Angular Scale Interferometer*, ou

interféromètre à l'échelle angulaire de un degré) ont mesuré la très faible polarisation qui a été imprimée à ce rayonnement micro-onde au moment où il a été libéré. Ce signal nous renseigne sur les grumeaux de plasma présents à cette époque.

L'essentiel de la lumière que nous recevons est non polarisée. Il est constitué de trains d'ondes électromagnétiques indépendants qui oscillent chacun dans des plans différents. Toutefois, la lumière non polarisée peut acquérir une direction d'oscillation privilégiée lorsqu'elle est diffusée ou réfléchi. Dans ce cas, l'essentiel de l'énergie du rayonnement incident est ré-émis sous forme d'ondes qui oscillent toutes dans un même plan.

Lorsque l'Univers était suffisamment chaud, le rayonnement qu'il contenait était en permanence absorbé et réémis au sein d'un plasma de particules chargées (protons et électrons). L'Univers s'étendant, la température de la matière et du rayonnement décru et les collisions entre photons et particules chargées se sont raréfiées. Finalement, les photons de basse énergie ne pouvaient plus détruire le nombre croissant de particules neutres (essentiellement des atomes d'hydrogène) qui commençaient à se former et le rayonnement fut libéré tandis que le gaz chaud passait à l'état neutre. Les cosmologistes nomment cette période « la recombinaison ». Elle s'acheva lorsque les photons du rayonnement



Une onde électromagnétique (a, en rouge) polarisée linéairement oscille dans un plan (en rose). Lorsqu'elle atteint un électron (en orange), elle lui imprime un mouvement oscillatoire qui provoque l'émission de l'onde diffusée (en vert). Cette onde est concentrée dans le plan perpendiculaire au mouvement (en vert) et polarisée comme l'onde incidente. Quand l'onde incidente n'est pas polarisée, elle peut tout de même être représentée comme la somme de deux ondes polarisées, l'une selon la direction de la ligne de visée (b, en rose), l'autre selon la direction perpendiculaire (en vert). Le rayon-

nement diffusé dû à la première composante est contenu dans le plan perpendiculaire à la ligne de visée et ne peut être observé. Seul nous parvient le rayonnement (en vert) induit par la seconde composante et polarisé comme elle. Lorsque la particule chargée reçoit des ondes non polarisées de différentes directions (c, en vert, rose, jaune et bleu), elle réémet vers l'observateur des ondes polarisées dans différentes directions. Si le rayonnement incident n'est pas isotrope, l'une de ces émissions polarisées est légèrement plus intense que les autres et l'on observe un léger excédent de polarisation.