

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.

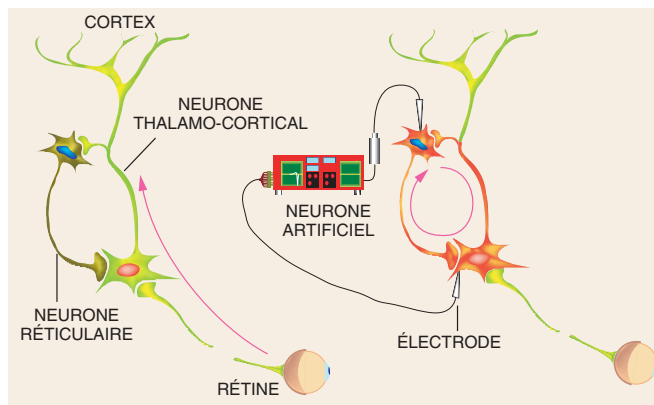
Nous perdons tous conscience une fois par jour : lorsque nous nous endormons. Les sons et les images cessent de parvenir à notre conscience. Au réveil, le contact avec les sensations extérieures revient. Tout se passe comme si le cerveau tirait un rideau sur le monde. Gwendal Le Masson, de l'Unité INSERM 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

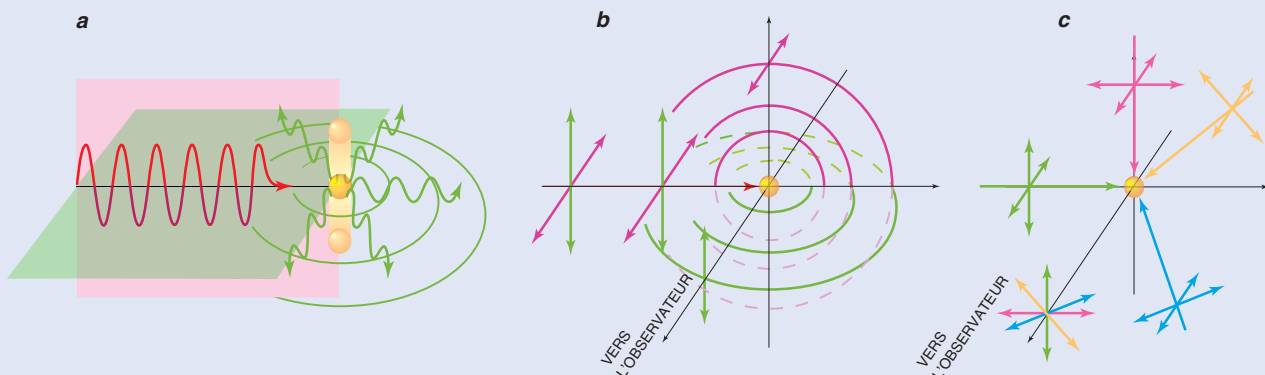
Aux informations gravées dans le rayonnement cosmologique fossile et déjà connues – son spectre et ses fluctuations –, s'ajoute sa polarisation, dont la mesure apporte de nouvelles informations sur l'Univers primordial.

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.

Le guidage des artères

Lors de la formation de l'embryon, les artères se mettent en place en calquant leurs trajectoires sur celles du système nerveux.

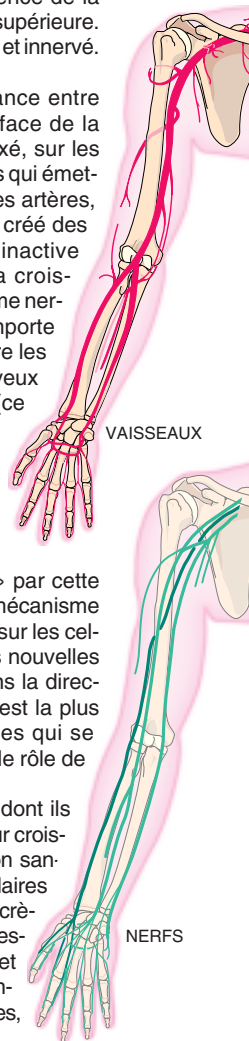
Ouvrez un livre d'anatomie à la page du système nerveux. Regardez les arborescences qui se prolongent dans les moindres recoins de l'organisme. Puis regardez le plan du réseau sanguin. De larges vaisseaux partent du cœur, puis se divisent en plus petits, jusqu'à atteindre les minuscules dimensions des capillaires. Cette observation montre que le réseau sanguin et le réseau nerveux sont dessinés sur le même modèle. On vient d'en comprendre la raison. Trois équipes de biologistes de l'Institut de technologie de Californie, du Centre Max Delbrück de médecine moléculaire de Berlin et de l'Université de Tokyo ont montré que le réseau des petites artères s'inspire du trajet des fibres nerveuses pour trouver sa place sous la peau. Les nerfs envoient des messages chimiques aux artères, et les attirent vers eux.

Le réseau des nerfs et celui des artères sont extrêmement ramifiés. La longueur totale de tous les vaisseaux sanguins mis bout à bout équivaut à deux fois la circonférence de la Terre, et la longueur du système nerveux est encore supérieure. Grâce à ces ramifications, tout l'organisme est irrigué et innervé. Pourquoi ces arborisations sont-elles identiques ?

L'équipe japonaise a observé la correspondance entre les fines artères et les fibres nerveuses à la surface de la peau d'embryons de souris. Ces biologistes ont fixé, sur les artérioles, des marqueurs moléculaires fluorescents qui émettent une lumière verte et révèlent le trajet précis des artères, identique à celui des fibres nerveuses. Puis ils ont créé des souris génétiquement modifiées : une mutation inactive une molécule normalement destinée à guider la croissance des neurones vers la peau. Dès lors, le système nerveux est bouleversé, et les fibres partent dans n'importe quelle direction. Pourtant, les artères suivent encore les fibres nerveuses, ce qui montre que le système nerveux guide le système artériolaire lors de sa formation (ce n'est pas le cas pour les veines).

Comment les neurones s'attachent-ils les services des petits vaisseaux ? On a découvert que les cellules de Schwann, des cellules entourant les neurones, émettent une molécule (un facteur de croissance vasculaire endothélial), concentré près de la cellule nerveuse. Les artères sont « attirées » par cette molécule, c'est-à-dire par le nerf. On a identifié le mécanisme de cette attraction. Le facteur de croissance se fixe sur les cellules artérielles, ce qui déclenche leur division. Les nouvelles cellules contribuent à la croissance de l'artère, dans la direction où la concentration en facteur de croissance est la plus forte. Le nerf attire aussi des cellules musculaires qui se fixent autour des artères, et qui, plus tard, joueront le rôle de petites pompes, pour propulser le sang.

Les artères apportent aux neurones l'oxygène dont ils ont besoin et produisent une molécule qui stimule leur croissance. En retour, les nerfs participent à la circulation sanguine en stimulant la contraction des cellules musculaires de la paroi des vaisseaux sanguins. En outre, ils sécrètent des peptides inflammatoires lorsque la peau est blessée. Cette étude a porté sur l'association des nerfs et des artères sous-cutanées, mais des mécanismes semblables sont sans doute en jeu dans de nombreux organes, dont la vascularisation reflète l'innervation.



Carte du fond de rayonnement cosmologique, où la polarisation (traits noirs) a été superposée à la température (du jaune au rouge).

cosmologique subirent leur dernière diffusion sur les dernières particules chargées libres. En 1968, l'astrophysicien Martin Rees prédit que, selon ce modèle, chaque point du fond de rayonnement cosmologique devait avoir acquis une polarisation légèrement différente des points voisins, précisément à l'instant de la dernière diffusion. Après plus de 30 ans de recherche, on vient enfin de mesurer ces fluctuations de la polarisation.

Lorsqu'une particule chargée, un électron, par exemple, reçoit une onde lumineuse, venue d'une direction donnée, le rayonnement qu'elle diffuse ne présente pas de direction privilégiée de polarisation. En revanche, la fraction de ce rayonnement qui est émise vers un observateur est polarisée dans une direction perpendiculaire à la direction de l'onde incidente. Dans le plasma primordial, un tel électron recevait de la lumière de nombreuses ondes indépendantes venues de toutes les directions, ondes dont la fraction diffusée vers la Terre est constituée de rayonnements polarisés, mais chacun dans une direction indépendante. Ainsi, si le rayonnement incident sur l'électron était parfaitement isotrope à l'époque de la recombinaison, la somme du rayonnement diffusé dans notre direction ne devrait pas faire apparaître de direction privilégiée... Cependant, le fond de rayonnement cosmologique n'est pas parfaitement isotrope. Il existe de petites fluctuations qui proviennent du fait que le plasma primordial n'était pas complètement homogène et isotrope. Ces petites fluctuations assurent qu'il reste un léger excédent de polarisation en chaque point de la surface de dernière diffusion. C'est la carte de cette polarisation que les astronomes du DASI viennent d'établir.

Ces mesures ont un double intérêt. Tout d'abord, il s'agit d'une nouvelle confirmation des modèles de Big Bang, puisqu'on a désormais la preuve que le rayonnement micro-onde a bien été émis à la suite d'une diffusion par un plasma. En fait, si l'on n'avait pas détecté de polarisation, les modèles les plus simples se seraient effondrés... De plus, la carte de la polarisation du rayonnement nous renseigne sur les fluctuations du plasma primordial, puisque ce sont elles qui provoquent en chaque point les petits excédents locaux de polarisation. Ces renseignements s'apparentent à ceux que l'on a obtenus en établissant la carte de l'intensité et de la température de ce rayonnement, mais, à la différence des fluctuations de température, le champ de la polarisation n'est pas modifié par la présence de nuages intergalactiques hétérogènes dans l'Univers actuel. Ces nuages déforment certainement la carte de température et d'intensité du fond de rayonnement, mais l'information imprimée dans sa polarisation, elle, nous parvient sans être dégradée. Ces mesures ouvrent, par conséquent, une nouvelle fenêtre sur la physique de l'Univers primordial.

Alejandro GANGUI, IAFE et Université de Buenos Aires

La géométrie dans la grammaire

La géométrie est inscrite au cœur de la grammaire palikur. Selon la dimension et la forme des objets, la numération diffère.

Voulez-vous apprendre à compter en palikur ? Quelques rappels de géométrie seront alors peut-être nécessaires. Les Palikur ne comptent pas de la même façon les cubes et les bouts de ficelle. Michel Launey, de l'Institut de recherches pour le développement et de l'Université Paris 7, a étudié la grammaire palikur. La Guyane compte plus de 170 000 habitants, dont environ 6 000 Amérindiens. Parmi eux, environ 1 000 Palikur habitent à Saint-Georges de l'Oyapock et dans divers villages des régions côtières.

Le palikur se caractérise par l'intégration de concepts géométriques dans la grammaire. Par exemple, pour énumérer les objets, les Palikur tiennent compte de leur dimension (1, 2 ou 3) et de leur symétrie. Ils distinguent ainsi six classes d'objets : les objets à trois dimensions sphériques, cubiques ou parallélépipédiques (orange, caisse, valise...) ; les objets à trois dimensions allongés (banane, bâton, bouteille...) ; à deux dimensions plats (miroir, natte, livre...) ; à deux dimensions concaves (pirogue, cuvette...) ; à une dimension sans tenir compte des extrémités (rivière, chemin, fil...) ; à une dimension avec une extrémité (cascade, puits, poteau...). Ils ont ajouté deux classes supplémentaires, de dimension atypique : la classe des « encombrants » qui contient des formes volumineuses irrégulières (nuage, village...) et celle des objets arborescents ou composés de plusieurs parties solidaires (arbre, collier...). Dans une phrase, les noms sont invariables, mais le cardinal (un, deux, trois...) dépend de la forme de l'objet.

Cela se complique pour dénombrer les ensembles d'objets. Dans ce cas, le nombre dépend de l'agencement des objets.

Règle 1 : le nombre (un ou deux) change selon la forme géométrique de l'objet.

Une orange : *pahow uwas*

Une corde : *pahatra kuwawta*

Deux oranges : *pisoya uwas*

Deux cordes : *pitahra kuwawta*

Règle 2 : le nombre varie selon que les objets sont isolés, regroupés, naturellement ou par un lien.

Un panier d'oranges : *pahayh panye*

deux paniers d'oranges :

pisina panye uwas. Une grappe de ouassailles (le fruit de palmier) : *pahatwi was* ; deux grappes de ouassailles : *pitiwna was*.

Une brochette de poissons : *pahaki im* ; deux brochettes de poissons : *pikina im*.

Le verbe *lavern* n'est pas identique si on lave une corde ou une rame.

Le suffixe est *-buk* si l'objet est linéaire et *-boha* ou *-bo* s'il est plat. Il existe ainsi neuf suffixes.

Il varie selon que l'ensemble est constitué d'objets autonomes (hommes, animaux), intrinsèquement reliés (grappes), attachés par un lien, emballés ou regroupés dans un panier.

Compter n'est pas chose aisée non plus. On utilise la base décimale, mais il n'existe pas de termes pour huit et neuf, qui se disent alors « sept avec un son ajout » et « sept avec deux son ajout ». Onze se dit logiquement « dix avec un son ajout » et dix-huit « dix avec sept son ajout avec un son ajout encore ». Cela se complique vite, ainsi 98 se dit « sept dizaines avec deux dizaines son ajout avec sept son ajout avec un encore ». Citons encore quelques particularités de cette langue : on ajoute des suffixes à de nombreux verbes et adjectifs en fonction de la forme de l'objet auquel ils ont trait. Le verbe *laver* n'est pas identique si on lave une corde ou une rame.

Cette langue, d'une grande subtilité, reste la langue maternelle de nombreux petits Palikur. Aujourd'hui plus des deux tiers des Palikur ont moins de 20 ans, mais ils s'intègrent mal dans le système scolaire, car les instituteurs, souvent métropolitains, ne parlent pas leur langue et rencontrent des difficultés pour établir des ponts entre le français et le palikur, et pour comparer les deux systèmes. Pour pallier cette difficulté, des linguistes tentent d'améliorer les échanges. Ainsi, M. Launey a rassemblé toutes les règles de la grammaire palikur.

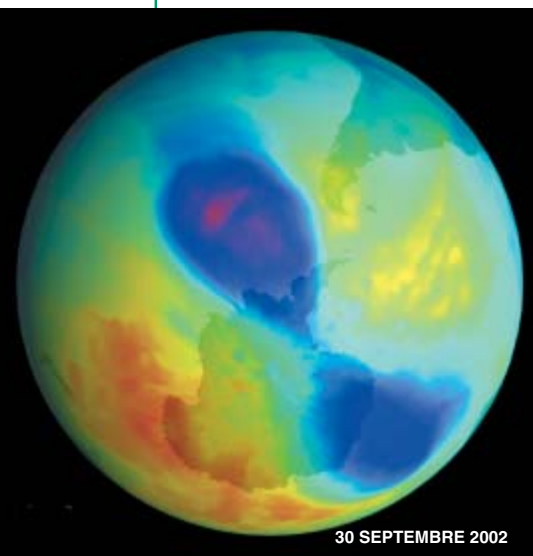
Double trou dans la couche d'ozone

Phénomène notable, le trou dans la couche d'ozone est plus réduit que celui de l'année 2001, à la même date ; de surcroît, il

s'est dédoublé. L'ozone stratosphérique qui nous protège des rayons ultraviolets serait-il moins menacé ? Non, répond Jean-Pierre Pommereau, du Service d'Aéronomie de l'Université Pierre et Marie Curie, car ce phénomène est une anomalie météorologique. Chaque année pendant la nuit polaire, un trou se forme dans la couche d'ozone, au-dessus de l'Antarctique. Le diamètre de cette zone est maximal vers la fin du mois de septembre, et régresse progressivement sous l'effet du soleil printanier qui réchauffe l'atmosphère de l'hémisphère Sud.

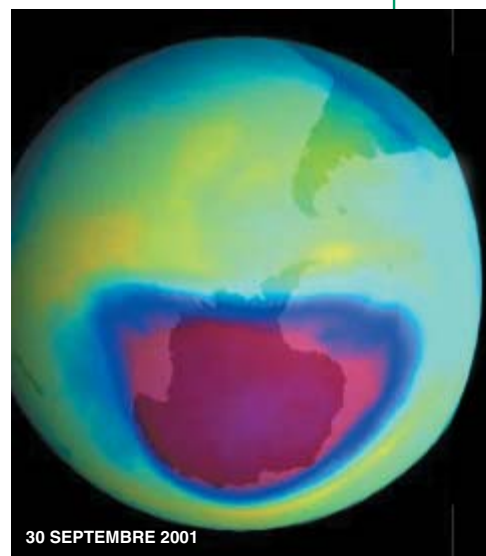
En septembre 2001, la surface du trou était plus de 30 pour cent plus étendue que cette année. Selon J.-P. Pommereau, cette diminution de la surface résulte d'une augmentation plus rapide de la température de la stratosphère, durant ce printemps austral. Une telle anomalie s'est déjà produite en 1988, et elle avait eu les mêmes conséquences. Quant au dédoublement du trou dans la couche d'ozone, il est encore plus

anecdotique : les deux trous se sont rassemblés en un seul quelques jours seulement après avoir été signalés.



30 SEPTEMBRE 2002

NASA/NOAA, Toms



30 SEPTEMBRE 2001

La forme d'une goutte qui ruisselle

Quand une goutte glisse assez vite sur une surface inclinée, un coin se développe sur sa frontière arrière, puis la queue se fractionne en perles.

Le ruissellement de gouttes en mouillage partiel est un phénomène étonnant. Le mouillage partiel se produit lorsqu'un liquide présente peu d'affinités pour un solide. Une goutte de pluie qui ruisselle sur une vitre révèle plusieurs comportements : certaines gouttes, immobiles, semblent « accrochées » au verre ; d'autres glissent, s'étirent, et finissent parfois par se fractionner en gouttelettes. Récemment, nous avons réalisé une étude expérimentale du ruissellement de gouttes sur un plan incliné. Nous avons montré que la complexité apparente du phénomène se développe à partir d'une forme très simple : les gouttes forment un front arrière en « coin ».

En apparence un peu académique, cette étude est en réalité d'une grande importance pour la compréhension de la dynamique du mouillage, c'est-à-dire des déplacements de la ligne de contact qui sépare une surface recouverte de liquide de celle qui ne l'est pas. Cette question est essentielle dans de nombreuses applications industrielles comme l'impression à jet d'encre, le traitement de l'eau, le ruissellement dans les échangeurs de chaleur, le dépôt d'un revêtement sur un substrat, par exemple.

Formées d'huile de silicone (des molécules constituées de chaînes de silicium et d'oxygène, Si-O), les gouttes que nous étudions glissent sur des surfaces de verre revêtues de vernis fluorés. On obtient ainsi des conditions très propres de mouillage partiel, stables et reproductibles, comparables à celles qu'assure le revêtement en téflon d'une poêle anti-adhésive. En faisant varier l'inclinaison de la plaque et la taille des gouttes, nous avons mis en évidence les différents régimes d'écoulement possibles. À faible vitesse, les gouttes ont une forme arrondie. Au-delà d'un certain seuil de vitesse, la « ligne de contact » entourant leur base devient anguleuse et forme un coin. Ceci signifie que la surface libre du liquide prend, à cet endroit, une forme conique. À mesure qu'augmente la vitesse, ce cône s'allonge jusqu'à former une queue liquide « perlante », qui finit par se fractionner en gouttelettes, sur le chemin de la goutte.

Les vitesses de transition entre ces différents régimes d'écoulement dépendent des propriétés physiques du liquide et de la surface (viscosité, tension de surface), mais pas des paramètres géométriques, la taille de la goutte, par exemple. Ainsi, c'est la nature de l'écoulement à l'arrière d'une goutte qui détermine sa façon de ruisseler. Pourquoi l'arrière de la goutte a-t-il une forme conique ? L'élasticité de l'interface liquide-air, caractérisée par un paramètre nommé tension de surface, tend naturellement à réduire la surface libre du liquide, donc sa courbure, de sorte que les pointes semblent, *a priori*, exclues. En d'autres termes, « la tension de surface arrondit les angles ». Quelles forces contrecarrent les effets de la tension de surface au voisinage de la pointe ?

Nous avons montré qu'il s'agit surtout des forces de friction visqueuse, à l'interface liquide-solide à l'arrière de la goutte. Généralement, un écoulement de liquide visqueux sur un plan incliné est soumis à la force de gravitation (qui entraîne le liquide vers le bas), aux frottements visqueux (qui le freinent) et à la tension de surface (qui influe sur la forme de la surface libre). Au voisinage de la pointe, l'effet de la gravité peut être négligé tant l'épaisseur de liquide, donc son poids, y est faible. Faisant l'hypothèse d'un équilibre entre les forces visqueuses et les forces de tension de surface, nous avons montré, avec Howard Stone, de l'Université de Harvard, que l'équation de Stokes qui gouverne les écoulements de fluides visqueux admet des solutions coniques, telles que celles que l'on observe dans l'expérience.

Sur le plan expérimental, nous avons aussi montré que l'angle d'ouverture du

coin s'ajuste pour que la vitesse apparente de la ligne de contact (vitesse de retrait du liquide mesurée perpendiculairement à la ligne) reste un peu au-dessous de la vitesse limite qui conduirait au dépôt d'un film de liquide sur le solide derrière la goutte. Le processus de formation du coin s'enclenche dès que la vitesse de la goutte atteint cette vitesse limite, de façon à minimiser l'augmentation de surface libre de liquide qui résulterait du dépôt d'un film. À partir d'une certaine taille de la queue, cet équilibre est rompu, et les gouttes ruisselantes finissent par semer des perles sur leur chemin.

Thomas PODGORSKI, Jean-Marc FLESSELLES,
Adrian DAERR et Laurent LIMAT,
Laboratoire PMMH, ESPCI (CNRS UMR 7636)



Une goutte d'huile glissant sur un plan incliné prend différentes formes (ovale, en coin, perlante...) suivant sa vitesse, qui augmente ici de (a) à (h). Le mouvement a lieu du haut vers le bas de la figure. L'illusion de relief, obtenue avec une huile et une plaque transparente, est donnée en éclairant la goutte par le dessous avec un fond lumineux non-uniforme.