

rocheux dont elle dissolvait les minéraux. Par la suite, d'autres indices, tels les modèles expliquant les mouvements de libration (des oscillations) d'Encelade, ont confirmé l'existence d'un océan global sous la croûte.

Quelles en sont les conséquences sur la place de l'eau liquide dans le Système solaire et la présence éventuelle de vie ailleurs ?

F. R. : Les mondes du Système solaire qui présentent de l'eau liquide sont bien plus nombreux que nous ne l'avions anticipé. Mars a eu de l'eau en abondance à sa surface ; Titan, Encelade, Europe (une lune de Jupiter) et d'autres ont des océans souterrains. Ceux-ci ne

aussi des lunes et de leurs interactions, des spécialistes tels que Sébastien Charnoz, de l'Institut de physique du globe, à Paris, ont pu élaborer des modèles pour expliquer leur formation et leur évolution. Ils ont notamment pu expliquer comment les débris s'agglutinent et forment de nouvelles lunes à partir d'une certaine distance, où les forces de marées deviennent assez faibles. Nous avons aujourd'hui une compréhension très poussée de la dynamique de ces anneaux. Reste une énigme, celle de leur âge.

La sonde Cassini pourra-t-elle fournir des éléments de réponse à cette énigme ?

F. R. : Depuis avril 2017, *Cassini* est entrée dans l'ultime phase de sa mission, surnommée le « grand final ». En modifiant sa trajectoire, la sonde passera 22 fois entre la planète et l'anneau D, le plus proche de la planète. Certains survols s'effectueront dans l'anneau D et d'autres très près de la partie supérieure de l'atmosphère de la planète. C'est assez risqué, mais nous pourrions observer de très près certains détails des anneaux et de la planète. Une partie de ces données devraient nous permettre de trancher sur l'âge des anneaux.

Nous espérons aussi cartographier le champ gravitationnel de la planète afin d'en déduire si Saturne héberge en son cœur un noyau rocheux d'environ dix masses terrestres, comme l'envisage le scénario classique décrivant la formation de la géante gazeuse, ou non.

En septembre, Cassini plongera dans Saturne. Pourquoi détruire ainsi la sonde ?

F. R. : Lors de ce plongeon, nous espérons récolter des informations jusqu'à la destruction de la sonde ou la perte du signal. Par ailleurs, la décision de faire s'abîmer la sonde dans la planète est liée à un souci de non-contamination. La sonde, qui n'a pas été stérilisée, pourrait encore transporter des bactéries terrestres. Si elle s'écrasait sur Titan ou Encelade, nous apporterions ces microorganismes sur ces mondes. Ce problème de contamination se présente pour chaque mission d'exploration, notamment sur Mars.

C'est aussi une façon de laisser la place à d'autres projets. La mission *Cassini-Huygens* lègue un héritage exceptionnel de découvertes, mais aussi de questions ouvertes. Les chercheurs réfléchissent déjà à de nouvelles idées pour explorer plus en détail Titan et Encelade, mais pas uniquement. La sonde *Juice* partira explorer les lunes de Jupiter à partir de 2022. Certains parlent d'aller rendre visite à Neptune (et sa lune Triton). Des missions qui auront, je l'espère, autant de réussite que *Cassini-Huygens*. ■

Propos recueillis par Sean Bailly

Les geysers d'Encelade ont été l'une des grandes surprises de la mission Cassini

gèlent pas grâce à l'énergie fournie par les importantes forces de marées dues à la planète géante gazeuse voisine. À l'inverse, l'océan de Charon, le compagnon de Pluton, a probablement gelé faute d'un apport suffisant d'énergie.

La lune Encelade est particulièrement intéressante dans le contexte de l'exobiologie. Le contact de l'eau liquide avec la roche fournit les ions indispensables à une forme de vie telle que nous la connaissons. Par ailleurs, la découverte récente de sources hydrothermales est encore un élément favorable. Mais alors comment aller chercher des preuves directes de cette vie, si elle existe ? L'analyse plus fine des composés rejetés dans les geysers nous donnerait peut-être des indices. En revanche, forer la croûte de glace sur plusieurs kilomètres semble, techniquement, illusoire.

Quelle est pour vous la découverte la plus marquante de la mission Cassini-Huygens ?

F. R. : Les jets d'Encelade constituent une découverte bien sûr extraordinaire. À mon avis, l'apport le plus important de *Cassini* concerne les anneaux. Grâce à la quantité et à la qualité des observations de ceux-ci, mais

BIBLIOGRAPHIE

F. Postberg et al.,
Sous l'océan d'Encelade,
Pour la Science, n° 471,
janvier 2017.

F. Chiavassa et F. Rocard,
**Quelle est la véritable
histoire du Système
solaire ?**, Le Pommier, 2015.

R. Lorenz et Ch. Sotin,
**La lune qui se prenait
pour une planète,**
Pour la Science, n° 393,
juillet 2010.

L'ESSENTIEL

> Depuis une dizaine d'années, l'étude de l'olfaction chez le chien a révélé les secrets de son odorat.

> Flux d'air optimisé dans sa cavité nasale, grande surface d'échange avec l'air, analyse combinatoire des odeurs, plusieurs facteurs contribuent à ses performances étonnantes.

> Dans le domaine judiciaire comme en médecine, des chiens dressés détectent des odeurs que nous ne décelons pas, comme celle des billets de banque ou des cancers.

> Les applications sont multiples et encore peu mises en œuvre.

L'AUTEURE



BARBARA FERRY
chercheuse CNRS en
neuroscience fondamentale
au Centre de recherches en
neurosciences de Lyon (CRNL).

Un flair qui a du chien

DÉTECTER À L'ODEUR DROGUE, BILLETS, ARMES, MINES, EXPLOSIFS, INSECTES NUISIBLES, STRESS ET CANCER... C'EST CE QUE FONT COURAMMENT AUJOURD'HUI DES CHIENS AU FLAIR EXCEPTIONNEL ET SPÉCIALEMENT ENTRAÎNÉS.

Hormis peut-être Rantanplan, le chien est un animal macrosmate : son environnement olfactif est aussi précis et détaillé que l'environnement visuel d'un oiseau de proie. Depuis longtemps, l'homme utilise l'odorat de son compagnon pour pister du gibier ou retrouver des personnes disparues. Mais ces dernières années, les domaines où ses extraordinaires capacités olfactives et sa vivacité ont été mises à profit se sont multipliés. Découverte de drogue, d'armes ou d'explosifs, détection de nuisibles animaux ou végétaux, identification de personnes souffrant d'anxiété ou d'hypoglycémie, voire atteintes de cancer à un stade précoce... les performances de l'odorat canin sont d'une variété étonnante. Et montrent que, même si tous les jours de nouvelles technologies remplacent les anciennes, l'homme peut se rassurer : l'acuité olfactive de son meilleur ami ne sera pas égalée de sitôt !

Premier animal à avoir été domestiqué, le chien, qui descend du loup, s'est intégré dans

notre quotidien depuis fort longtemps. La découverte récente d'un crâne de canidé dans les grottes de l'Altai, dans le sud de la Sibérie, prouve en effet que le processus de domestication des loups, favorisé par un habitat majoritairement sédentaire, a commencé il y a 33 000 ans. En élevant des louveteaux et sélectionnant les plus dociles, l'homme a trouvé chez le loup un compagnon de vie idéal.

ULTRASENSIBLE AUX ODEURS

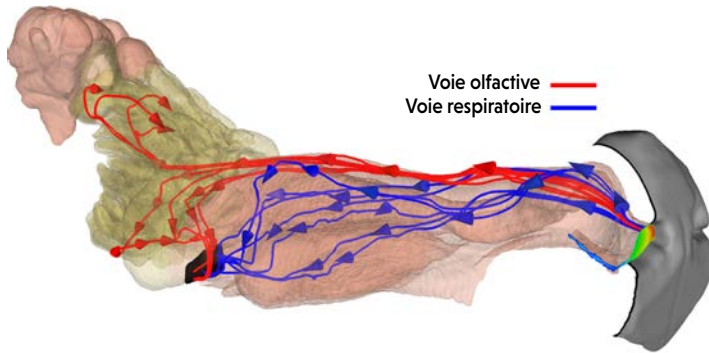
La très grande acuité olfactive de l'animal s'est révélée un atout pour aider son nouveau maître à chasser et à garder son territoire contre un peu de nourriture. Cette relation de commensalisme a conditionné des changements physiques (génétiques) et comportementaux qui ont transformé le loup en chien. Mais avec l'apparition des machines pour le travail, de l'élevage et des armes, le rôle du chien a évolué. Si l'homme l'utilise toujours comme pisteur au cours de la chasse, il s'est peu à peu aperçu que les remarquables compétences olfactives de son commensal lui permettaient d'identifier la présence de molécules >



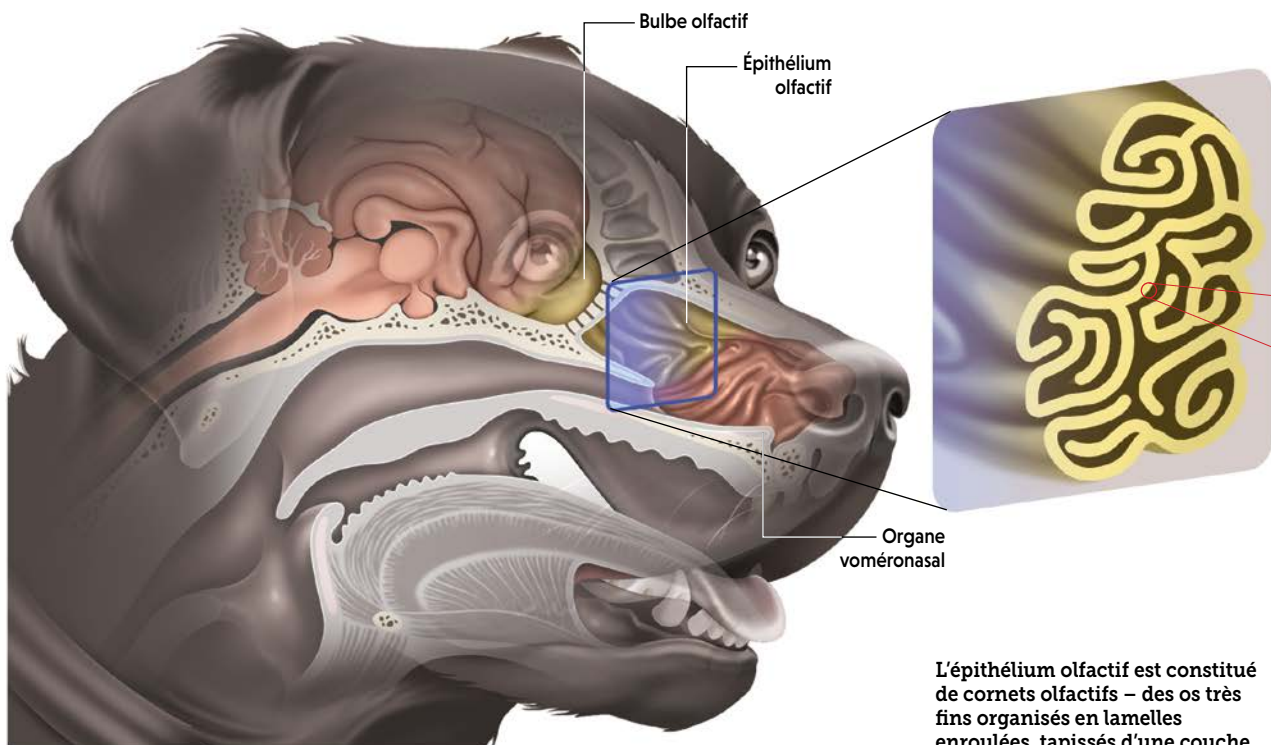
UNE ANATOMIE SOPHISTIQUEE

Le chien doit son odorat à un appareil olfactif particulièrement développé. La zone sensorielle du museau est située dans la partie supérieure et au fond de la cavité nasale (*ci-dessous*). Elle est constituée de fines lamelles osseuses enroulées sur elles-mêmes et recouvertes d'un épithélium, ce qui permet d'avoir une surface d'échange maximale entre la zone de traitement sensoriel et les molécules odorantes présentes dans l'air inspiré. Des travaux d'imagerie par résonance magnétique

ont aussi montré que le flux d'air qui atteint l'épithélium olfactif ne se mélange pas à l'air utilisé pour respirer, ce qui facilite le traitement des odeurs. Dans cette zone, des neurones dits sensoriels ou olfactifs captent les molécules odorantes à l'aide de récepteurs spécifiques et transmettent au cerveau les informations sensorielles ainsi reçues, par l'intermédiaire d'une analyse combinatoire d'une grande précision réalisée dans le bulbe olfactif (*en bas à droite*).

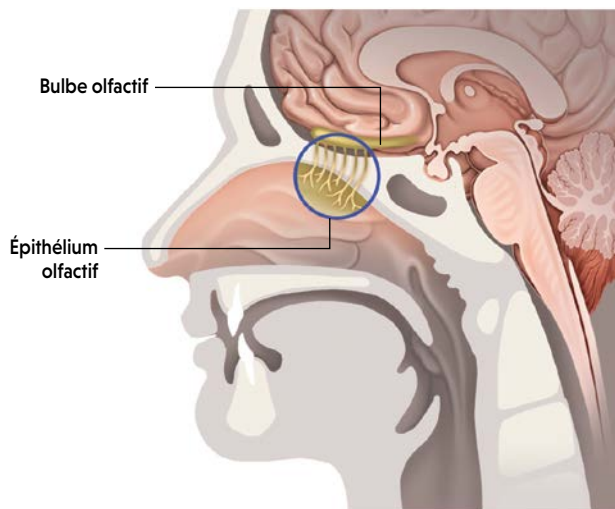


Lors de l'inspiration, la truffe se contracte, ce qui envoie l'air vers le haut. Une membrane sépare alors le flux en deux, et 12 % de l'air inspiré est envoyé dans la zone sensorielle (*en rouge*). Le reste atteint les poumons via le pharynx (*en bleu*). Lors de l'expiration, le flux d'air est envoyé sur les côtés des narines, ce qui l'empêche de se mélanger à l'air inspiré. Les molécules olfactives se concentrent ainsi dans le seul flux entrant.



Plusieurs structures sont impliquées dans le traitement des odeurs chez le chien. Le bulbe olfactif est la région du cerveau où arrivent les informations en provenance directe de la zone sensorielle de la cavité nasale, l'épithélium olfactif. Le bulbe du chien est trois fois plus grand que celui de l'homme, même si le cerveau canin est dix fois plus petit. L'organe voméronasal, quant à lui, est spécialisé dans la détection des phéromones, ces messagers chimiques qui jouent un rôle dans l'attraction sexuelle notamment...

L'épithélium olfactif est constitué de cornets olfactifs – des os très fins organisés en lamelles enroulées, tapissés d'une couche de cellules (un épithélium) à la surface de laquelle sont situées quelque 250 millions de cellules réceptrices spécialisées dans la capture des molécules olfactives, contre 5 millions chez l'homme. Grâce aux lamelles enroulées, la surface réceptrice peut atteindre 200 cm² contre 2 à 3 cm² chez l'homme.



Chez l'humain, la zone sensorielle de la cavité nasale est plus petite et non enroulée. Son bulbe olfactif n'occupe que 0,01 % du cerveau, contre 0,31 % chez le chien. L'animal est capable de discriminer 500 000 odeurs, alors que l'homme est limité à 10 000. Néanmoins ce dernier est plus sensible à certaines molécules odorantes comme l'acide valérique, utilisé dans la synthèse d'arômes et d'adoucissants, sans doute en partie grâce à ses capacités cognitives.

➤ odorantes en très petite quantité et non décelables par le nez humain.

La détection et la discrimination des odeurs sont un processus indispensable à la survie (identification de source de nourriture, de la présence de la mère, de prédateurs) et à la reproduction (identification d'un partenaire sexuel et de sa disponibilité reproductive) de nombreuses espèces animales et l'on comprend aisément pourquoi ce système, parfois très complexe, spécialisé dans la détection et l'identification des molécules odorantes en suspension dans l'air, a été préservé au cours de l'évolution, notamment chez les mammifères.

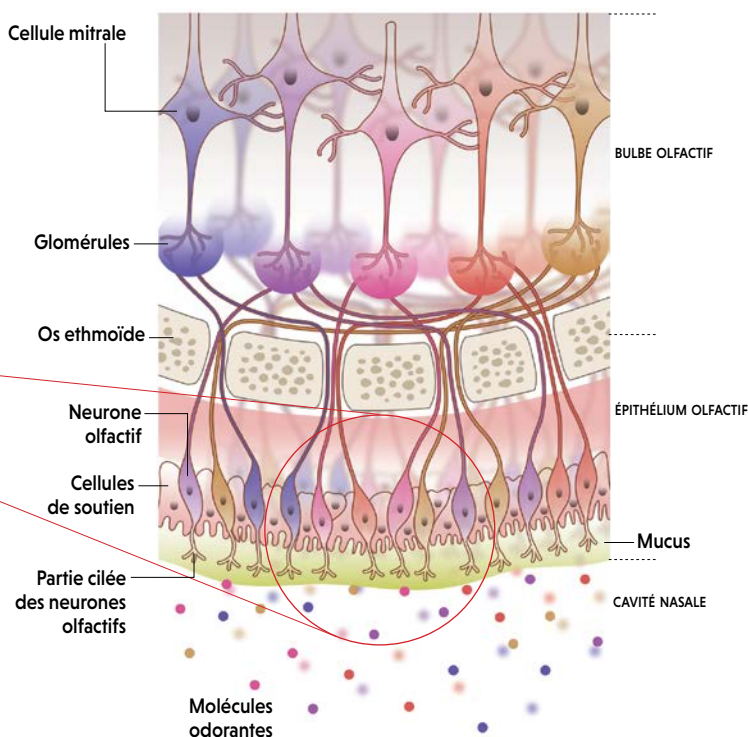
Si l'étude du sens de l'olfaction a longtemps été négligée par rapport à celle de la vue et de l'ouïe, elle connaît un regain d'intérêt depuis un peu plus d'une quinzaine d'années. Bénéficiant de nouvelles technologies développées en recherche fondamentale, l'étude de l'olfaction a permis de comprendre les mécanismes par lesquels les odeurs sont transmises au cerveau après avoir été captées et transmises par le système sensoriel périphérique – le nez. Ainsi, dès 2007, en étudiant la dynamique des fluides à l'intérieur de la cavité nasale du chien, l'équipe de Gary Settles, de l'université de Pennsylvanie, aux États-Unis, a montré que sa structure anatomique particulière est organisée de telle manière qu'elle optimise l'efficacité du transport des odeurs et que le nez du chien fonctionne totalement différemment du nôtre (voir l'encadré ci-contre).

UN MUSEAU OPTIMISÉ

Lorsque nous inspirons, l'air que nous sentons et que nous respirons fait partie d'un seul et même flux. Alors que chez le chien, la présence d'une membrane à l'intérieur du museau permet de séparer le flux d'air entrant en deux : l'un est envoyé dans les poumons et permet la respiration, tandis que l'autre sert à sentir. Et cela d'autant mieux que les muscles de sa truffe se contractent de manière à orienter le flux d'air vers le haut et à l'envoyer ainsi préférentiellement dans la zone sensorielle olfactive. Ensuite, au cours de l'expiration, le flux d'air ressort sur les côtés des narines comme l'ont montré les travaux d'imagerie en résonance magnétique menés par l'équipe de Gary Settles en 2009. Cette dynamique particulière de l'air inspiré et expiré potentialise le traitement des odeurs.

Afin de maximiser la détection de celles-ci, le chien « flaire » : par une série d'inhalations et d'expirations rapides (environ six fois par seconde), il crée une turbulence interne qui accroît le transport des molécules odorantes jusqu'aux récepteurs situés dans la zone sensorielle olfactive. Les chiens de chasse en particulier maintiennent ainsi sur leur muqueuse olfactive un flux interne constant chargé de ➤

Illustrations : Delphine Bailly - Vue 3D : Brent Craven



À la surface de l'épithélium olfactif, des neurones sensoriels captent les molécules odorantes qui pénètrent dans le mucus à l'aide de récepteurs situés sur les cils qu'ils présentent à leur extrémité. Chaque neurone exprime un seul type de récepteur. À leur autre extrémité, les axones de chaque cellule réceptrice forment un faisceau de 10 à 100 axones, lequel traverse l'os ethmoïde, situé à la base du crâne. Les faisceaux convergent dans le bulbe olfactif vers d'autres neurones, les cellules mitrales, formant des sortes de bourgeons, les glomérules. Chaque glomérule reçoit les terminaisons de plusieurs milliers de neurones sensoriels qui portent tous le même type de récepteur olfactif. Les axones des cellules mitrales assurent les connexions entre le bulbe olfactif et les régions du cerveau qui traitent l'information sensorielle – dont le système limbique.

> molécules odorantes, même en phase d'expiration ou en pleine course. De plus, et contrairement à nous, chaque narine fonctionne de manière indépendante, ce qui fournit au chien une meilleure précision sur la provenance de certaines odeurs.

Comme les fanons d'une baleine trient le krill, l'organisation de la muqueuse olfactive, enroulée sur elle-même, offre une grande surface d'échange où les molécules odorantes inspirées sont triées selon leur composition chimique grâce à des récepteurs olfactifs. Ces derniers sont des protéines membranaires situées sur la surface des cils prolongeant les neurones sensoriels de la muqueuse qui baignent dans du mucus. Comme chez tous les mammifères, ces récepteurs captent et fixent les molécules en fonction d'un certain nombre de propriétés (poids moléculaire, densité électronique, polarisabilité, organisation tridimensionnelle...). Chaque neurone sensoriel exprime un seul type de récepteur.

DES COMBINAISONS D'ACTIVATION DES NEURONES

À leur autre extrémité, les neurones sensoriels rassemblent leurs axones en faisceaux qui convergent dans le bulbe olfactif, où d'autres neurones prennent le relais et transmettent l'information sensorielle reçue aux centres primaires et secondaires (dont le système limbique) du cerveau qui vont les traiter (*voir l'encadré pages 42 et 43*).

En 1999, l'équipe de Linda Buck (qui a reçu le prix Nobel de médecine en 2004 pour ses travaux sur les récepteurs olfactifs des mammifères) a montré, grâce à l'imagerie calcique – une technique qui permet de suivre l'activation de larges populations de neurones en temps réel –, qu'un récepteur olfactif de la muqueuse répond à plusieurs molécules odorantes de structures chimiques différentes et que, à l'inverse, plusieurs récepteurs olfactifs

répondent à la même molécule olfactive. Le codage de l'odeur résulte donc d'une activation combinatoire d'un ensemble de récepteurs. Chaque odeur est ainsi représentée, à l'entrée du bulbe olfactif, par une carte d'activité fonctionnelle qui lui est propre. Ce système combinatoire permet, malgré un nombre limité de récepteurs (environ 1 200 chez le chien, 400 chez l'humain) de discriminer des milliers de molécules odorantes naturelles ou non (plus de 500 000 chez le chien, environ 10 000 chez l'humain).

APPRENDRE À « MARQUER » UNE ODEUR

Ce flair exceptionnel fait du chien un merveilleux « outil de détection », extrêmement performant dans de nombreux domaines allant de la sécurité publique aux besoins de santé, à condition d'avoir suivi un dressage approprié.

Au début de sa formation, quelle que soit sa spécialité, le chien doit apprendre à mémoriser l'odeur cible qu'il devra détecter par la suite. Son dresseur le motive en utilisant son instinct de chasse et son goût pour les récompenses : il donne au chien un jouet ou une friandise à chaque fois qu'il détecte l'odeur cible. Rapidement, le chien montre un réel plaisir à effectuer la tâche. Mais, surtout, il intègre très vite les règles du jeu : pour obtenir la récompense, il doit « marquer » l'odeur cible, c'est-à-dire montrer une réponse comportementale conditionnée qu'on lui a apprise : s'asseoir devant la prise, aboyer, retourner chercher son maître...

La finesse du dressage est capitale pour que l'animal ne commette pas d'erreur de reconnaissance, ou très peu, au cours de son travail

LE GOÛT D'UNE CUILLERÉE DE SUCRE

L'odorat et le goût vont de pair. Un chien distingue le goût laissé par une cuillère de sucre dans 4 millions de litres d'eau, soit le volume de deux piscines olympiques, aussi clairement que nous distinguons le goût laissé par cette même cuillère dans notre café...

Dans le bulbe olfactif de souris (*ci-dessous*), des régions différentes (glomérules) s'activent selon la molécule sentie (*ici des aldéhydes différents comportant de 4 à 8 atomes de carbone, de gauche à droite*). Chaque carte d'activation bulbaire est propre à une molécule olfactive.

