

Des boussoles chez

La perception du champ magnétique de la Terre par certains animaux est aujourd'hui bien établie. Reste à en découvrir les mécanismes et à mieux comprendre comment les animaux s'en servent.

Robert Srygley

Les tortues caouanes (*Caretta caretta*) éclosent sur la terre ferme, mais se dirigent très rapidement vers la mer, où elles se nourrissent et grandissent jusqu'à leur maturité. À partir des plages de Floride qui les ont vues naître, elles suivent un itinéraire circulaire. Celui-ci suit en général le Gulf Stream en direction du Nord, puis de l'Est, pour contourner la mer des Sargasses en direction de l'Europe occidentale, descend ensuite vers le Sud vers l'Afrique occidentale et revient vers l'Ouest dans la mer des Caraïbes. Lorsque les tortues reviennent sur les plages pour pondre leurs œufs, la grande majorité d'entre elles retournent sur la plage même qui les a vues éclore.

Comment ces animaux s'orientent-ils dans une mer si vaste et apparemment dépourvue de repères précis ? De multiples études, certaines datant de plus de 40 ans, d'autres très récentes, démontrent que les tortues marines (voir les figures 1 et 3), mais aussi beaucoup d'autres animaux – l'abeille domestique, des fourmis, des papillons migrants, la langouste de Cuba, le pigeon domestique, le rat-taupe commun, etc. –, sont sensibles au champ magnétique terrestre et l'exploitent pour s'orienter. J'évoquerai quelques-unes des expériences les plus marquantes ayant mis en évidence une perception du champ magnétique chez des animaux et son rôle dans leur orientation. Sera ensuite abordée la question des mécanismes sous-jacents, question non résolue mais qui a connu des développements récents.

Revenons aux tortues marines. Dès la fin des années 1980, Ken Lohmann et ses collègues de l'Université de la Caroline du Nord ont émis l'hypothèse que, comme le champ magnétique terrestre dépend de l'endroit considéré le long de la route migratoire, il peut servir à l'orientation des tortues. Pour vérifier si l'orientation prise par des tortues nouvellement écloses dépend de celle du champ magnétique terrestre, les biologistes ont construit une cage

métallique comportant des bobines électriques afin de recréer le champ magnétique régnant en trois endroits de l'océan Atlantique, situés sur la boucle migratoire. Ils ont capturé des tortues venant d'éclore et les ont munies d'un hamais, puis les ont immergées dans une cuve d'eau entourée par la cage métallique : dans chaque cas, les tortues ont nagé dans la bonne direction, celle correspondant à l'itinéraire migratoire (voir la figure 3).

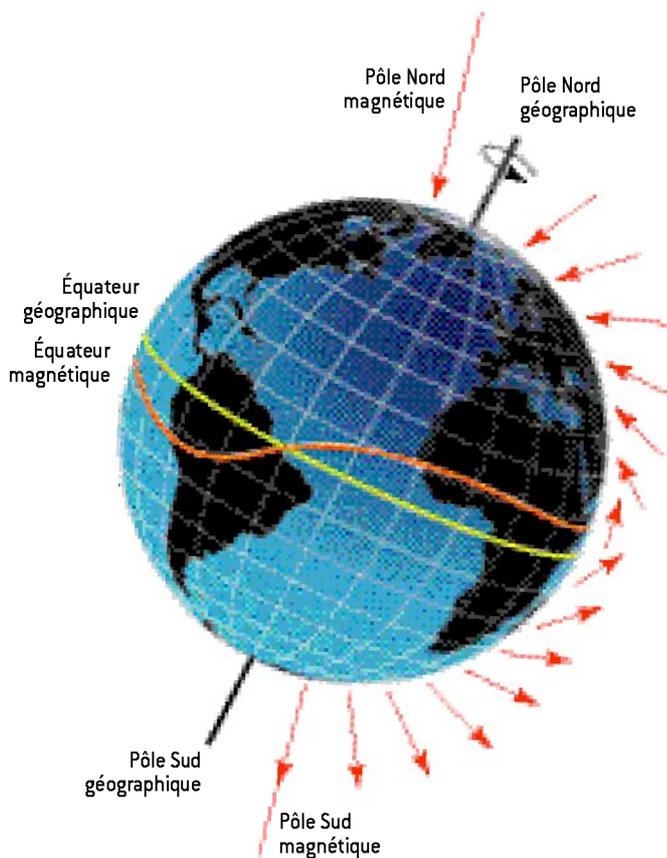
Qu'est-ce qui, dans le champ magnétique, pourrait servir de poteau indicateur si évident pour les tortues venant de naître et n'ayant encore jamais quitté leur plage natale ? Et d'ailleurs, se fient-elles à un seul type de poteau indicateur ? Examinons pour commencer quels sont les repères qu'offre le champ magnétique terrestre (voir la figure 2). Avec son noyau constitué de fer liquide, la Terre se comporte comme une énorme barre aimantée. Les lignes de champ magnétique émergent du pôle magnétique Sud et convergent vers le pôle magnétique Nord. Le champ géomagnétique fait pivoter l'aiguille aimantée de nos boussoles de randonnée. Celles-ci sont sensibles à la polarité du champ géomagnétique : elles indiquent à tout moment le pôle magnétique Nord. La polarité du champ est ainsi un premier repère, bien qu'il soit indéfini à proximité d'un pôle magnétique, où le champ magnétique est vertical.

Un deuxième repère d'orientation est l'angle que fait le champ magnétique par rapport à l'horizontale. Cet angle, nommé inclinaison magnétique, est de 90 degrés au pôle magnétique Nord, où le champ magnétique est vertical et dirigé vers le bas, et s'annule à l'équateur magnétique, où le champ est horizontal. L'inclinaison réaugmente ensuite, car le champ est à nouveau orienté verticalement

1. Les tortues marines effectuent de longues migrations en mer, milieu qui n'offre pas de repères évidents. Pourtant, elles reviennent pondre sur les plages de leur naissance. On sait que les variations du champ magnétique terrestre les aident à s'orienter.

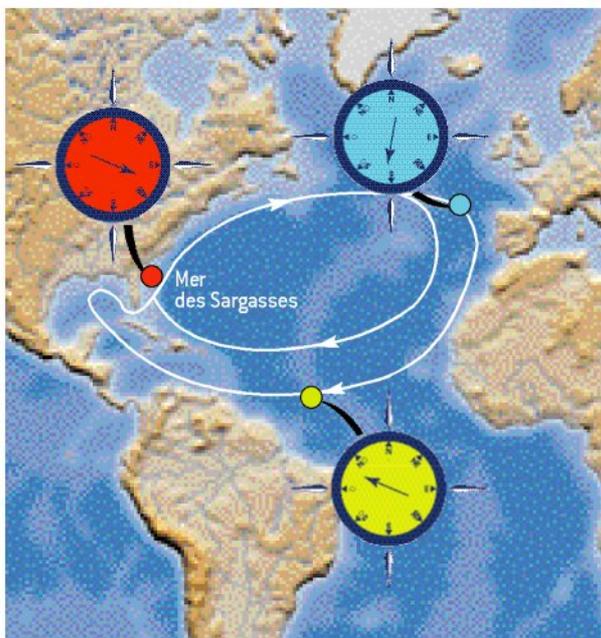
les animaux





Pour la Science d'après W. et R. Wiltschko, 1995

2. Le champ magnétique de la Terre [indiqué sur un méridien par les flèches rouges] varie en intensité et en direction selon le lieu considéré. Il est horizontal à l'équateur magnétique [ligne rouge], s'incline progressivement jusqu'à 90 degrés au pôle magnétique Nord et jusqu'à -90 degrés au pôle magnétique Sud. Son intensité (indiquée par la longueur des flèches) est maximale près des pôles magnétiques et minimale près de l'équateur magnétique.



3. Les tortues caouanes quittent leurs plages natales de la Floride et tournent plusieurs fois autour de la mer des Sargasses dans le sens horaire, en suivant les courants, avant de revenir des années plus tard. Des expériences menées sur une plage à l'Est de la Floride consistaient à exposer des tortues marines venant d'éclore à trois champs magnétiques artificiels, reproduisant le champ géomagnétique régnant aux endroits indiqués par les pastilles. Les tortues nageaient, en moyenne, dans les directions correspondant à celles de la route migratoire, pour les lieux simulés.

au pôle Sud, mais cette fois vers le haut. Ainsi, l'inclinaison correspond à peu près à la latitude à la surface de la Terre, bien que l'équateur magnétique soit légèrement incliné par rapport à l'équateur géographique (cercle perpendiculaire à l'axe des pôles géographiques).

L'intensité du champ magnétique varie également dans l'espace et atteint son maximum près des pôles et son minimum à proximité de l'équateur magnétique. Cette intensité fournit donc un troisième élément d'orientation, si l'animal est capable d'en ressentir les variations. Dans les expériences de l'équipe de K. Lohmann sur les tortues caouanes, les chercheurs jouaient d'ailleurs à la fois sur l'inclinaison du champ et sur son intensité pour reproduire les champs magnétiques régnant en divers points de la route migratoire.

Polarité ou inclinaison du champ ?

Un repère de direction peut être ainsi fourni soit par la polarité, soit par l'inclinaison du champ géomagnétique. Pour les abeilles, les fourmis, les langoustes de Cuba, les rats-taupes aveugles de Zambie, pour ne citer que quelques espèces, c'est la polarité du champ magnétique terrestre qui procure à ces animaux une direction de référence. Ainsi, mon équipe de recherche étudie des fourmis coupeuses de feuilles (*Atta colombica*) actives la nuit dans la forêt tropicale humide du Panama et des papillons (*Aphrissa statira*) qui migrent à travers la mer des Caraïbes. Nous avons construit un grand dispositif à bobines électromagnétiques, de huit mètres cubes, permettant d'inverser la polarité du champ magnétique à l'intérieur de cette structure. Nous avons constaté, en 2003 pour les fourmis et en 2005 pour les papillons migrants, que ces insectes modifient leur direction (de près de 180 degrés pour les papillons) lorsqu'on inverse la polarité magnétique. Ces expériences, effectuées en prenant soin de masquer le soleil – un autre repère utilisable par les animaux –, démontrent que ces fourmis et papillons sont sensibles à la polarité du champ géomagnétique et suggèrent que des indices magnétiques sont utilisés pour l'orientation, en complément d'autres indices (visuels ou chimiques, notamment).

Pour les tortues marines et les oiseaux migrants, c'est l'inclinaison du champ magnétique qui offre une direction de référence. Des expériences menées en 1971 par Wolfgang et Rosawith Wiltschko à l'Université de Francfort l'ont démontré pour les rouges-gorges européens. Des oiseaux en cage ont été soumis à diverses configurations magnétiques, notamment: le champ géomagnétique normal; ce même champ avec sa composante horizontale inversée (c'est-à-dire même inclinaison, mais le Nord magnétique au Sud géographique); le même champ avec sa composante verticale inversée (c'est-à-dire une inclinaison inverse); le même champ avec ses deux composantes inversées (c'est-à-dire une polarité inverse) (voir la figure 4). L'agitation des oiseaux dans la cage définissait une direction de migration Nord-Nord-Est dans le premier et le quatrième cas, mais une direction opposée, Ouest-Sud-Ouest, dans les deuxième et troisième cas. Ces résultats démontrent que les rouges-gorges sont sensibles à l'inclinaison du champ, mais pas à sa polarité (qui est Sud-Nord dans les premier et troisième

4. Des expériences sur des rouges-gorges européens ont consisté à enregistrer l'agitation migratoire d'oiseaux en cage et soumis soit au champ géomagnétique naturel [a], soit à un champ de même intensité mais de polarité ou d'inclinaison opposées [b, c, d]. La direction moyenne d'agitation était vers le Nord en champ géomagnétique normal [a] et avec un champ de polarité opposée [d], et vers l'équateur quand l'axe du champ avait subi une symétrie par rapport à l'axe vertical, ce qui correspond à une inclinaison opposée [b et c]. Cela a démontré que la boussole des rouges-gorges est sensible à l'inclinaison du champ géomagnétique, mais pas à sa polarité.

cas, et Nord-Sud dans les deuxième et quatrième cas). Ainsi, les oiseaux migrateurs et les tortues ne semblent pas percevoir la polarité magnétique. Ils distinguent plutôt la direction du pôle magnétique de celle de l'équateur grâce à l'inclinaison du champ magnétique local par rapport à une référence verticale, fournie par exemple par la gravité.

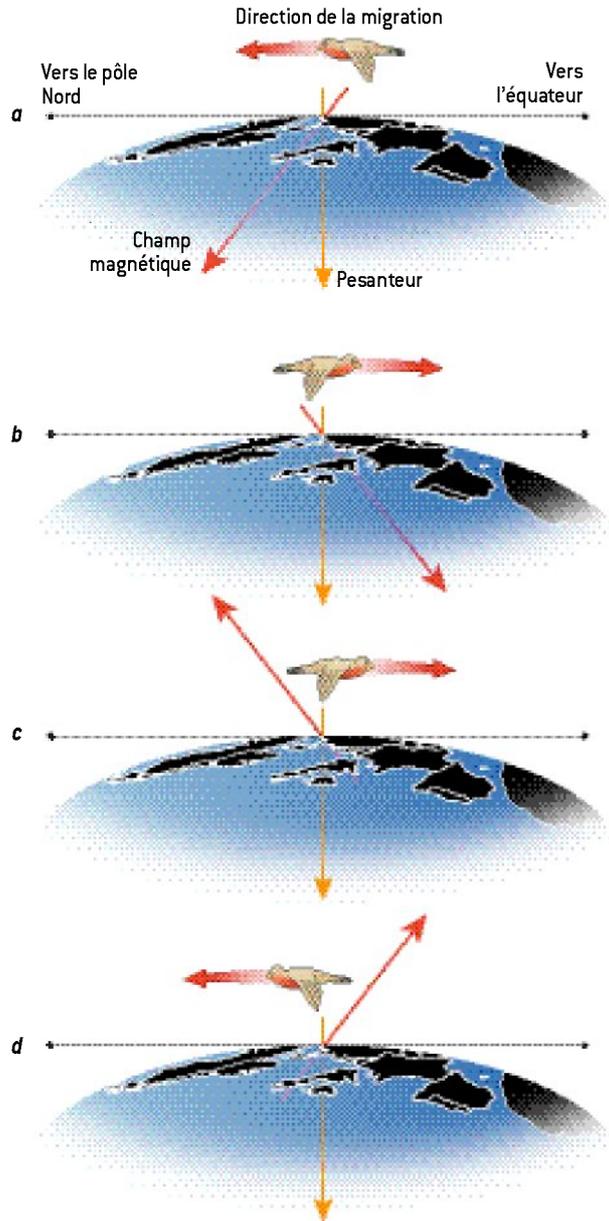
Sur les côtes de la Floride, des langoustes de Cuba (*Panulirus argus*) vivent dans des anfractuosités des récifs coralliens. Elles y reviennent après être allées se nourrir. Des recherches antérieures de K. Lohmann, datant de 1995, avaient montré que les langoustes sont sensibles à des inversions de la polarité du champ magnétique terrestre, mais pas qu'elles sont sensibles à celles de l'inclinaison du champ. Cependant, lors d'une étude plus récente effectuée vers 2002, K. Lohmann et son collègue Larry Boles ont remarqué que quand on déplaçait des langoustes d'une quinzaine à une trentaine de kilomètres vers un lieu qui leur était inconnu, les crustacés, aux yeux occultés par des capuchons pour qu'ils ne puissent pas se servir de repères visuels, s'orientaient vers leur site d'origine, bien que la polarité du champ magnétique terrestre fût inchangée.

Les langoustes gardent le cap

Les deux chercheurs ont capturé un nouveau groupe de langoustes de Cuba et l'ont déplacé d'une trentaine de kilomètres. Sur le site où ils ont relâché les langoustes, des bobines électromagnétiques reproduisaient le champ magnétique régnant soit à 400 kilomètres au Nord, soit à 400 kilomètres au Sud de l'habitat récifal de ces crustacés. Les langoustes se sont dirigées vers le Sud dans le premier cas et vers le Nord dans le second cas, comme on s'y attendrait si elles percevaient non seulement la polarité du champ magnétique terrestre, mais aussi son inclinaison et son intensité (voir la figure 5).

Bien que les langoustes soient capables de migrer sur des distances de plus de 400 kilomètres, ces individus ne s'étaient probablement jamais rendus en un lieu où le champ magnétique terrestre était équivalent à celui créé artificiellement. Leur capacité à se diriger vers leur habitat d'origine après avoir été déplacées en un nouvel endroit indique donc une faculté de navigation, comme si elles disposaient d'une carte. Dans le monde des langoustes, la polarité du champ géomagnétique fournit une direction de référence ; l'inclinaison et l'intensité de ce champ constituent, elles, un repère de position, que ces crustacés semblent percevoir et utiliser pour se localiser par rapport à leur habitat.

Si des animaux disposent d'une carte, il s'agit d'une représentation cognitive de l'espace, telle la mémoire plus ou moins précise que nous avons d'une carte sur papier. Un animal doté d'une carte cognitive devrait pouvoir trouver



sa route vers une destination donnée à partir d'un endroit où il n'a jamais été auparavant. Le test consiste donc à vérifier si un animal trouve son chemin (généralement pour rentrer dans son repaire) à partir d'un endroit nouveau. Comme c'était le cas pour les langoustes, il s'agit de transporter l'animal vers cette nouvelle origine en supprimant tous les indices (visuels, chimiques, etc.) qu'il pourrait accumuler en chemin.

L'utilisation d'indices magnétiques à des fins d'orientation a également été mise en évidence chez de nombreux oiseaux migrateurs. Tel est le cas des parulines rayées (*Dendroica striata*). Lors de leur première migration automnale, les parulines rayées d'Europe occidentale se dirigent vers le Sud-Ouest, alors que celles d'Europe orientale se dirigent vers le Sud-Est. Ces deux directions évitent à ces fauvettes une traversée des Alpes, plus risquée. Des hybrides des deux populations se dirigent en moyenne vers le Sud ; cela suggère que l'orientation a une composante génétique. Les gobe-mouches noirs (*Ficedula hypoleuca*) manifestent eux aussi un évitement des Alpes dans leur navigation à l'aide du champ magnétique. Ils se dirigent vers le Sud-Ouest quand on les soumet au champ magnétique de leur

site de capture, au Nord des Alpes, alors qu'ils se dirigent vers le Sud-Est lorsqu'ils sont en présence du champ magnétique caractéristique d'Afrique du Nord.

Les changements de champ magnétique peuvent également induire des modifications de la physiologie migratoire. Cecilia Kullberg, de l'Université de Stockholm, et ses collègues l'ont montré en 2003 dans le cas du rossignol progré (*Luscinia luscinia*). Cet oiseau a constitué lentement des réserves de graisse quand on l'a soumis au même champ magnétique que celui d'un site suédois, au début de sa route migratoire. En revanche, les passereaux ont stocké des graisses plus rapidement quand ils ont été soumis au champ magnétique correspondant à un lieu du Nord de l'Égypte, à peu près au milieu de leur route migratoire. Il est possible que le champ magnétique reproduisant celui d'Égypte du Nord ait induit le besoin de faire davantage de réserves d'énergie, comme l'aurait nécessité une traversée sûre du désert du Sahara.

Une boussole assiste l'autre

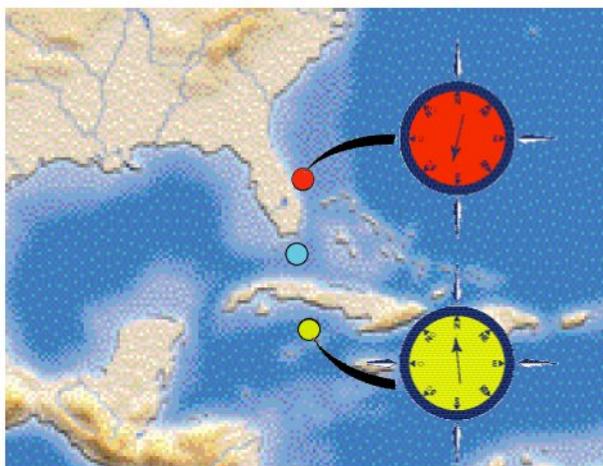
De nombreux animaux se fient à plus d'un moyen de navigation, un repère type étant le Soleil pour les animaux diurnes et le mouvement des étoiles dans le ciel pour les passereaux migrateurs nocturnes. Or des moyens de navigation différents sont parfois en conflit. Par exemple, les repères que constituent le Soleil et les étoiles sont tous deux fondés sur la rotation de la Terre autour de ses pôles géographiques, alors que la boussole indique les pôles magnétiques (le Nord géographique se situe dans l'océan Arctique, tandis que le Nord magnétique est décalé de 11 degrés et se situe sur l'île canadienne d'Ellsmere). L'angle entre l'axe des pôles géographiques et la direction du champ géomagnétique, nommé déclinaison magnétique, varie selon l'endroit où l'on se trouve à la surface du globe. Les pôles magnétiques n'étant pas des points fixes, la déclinaison change aussi à des échelles de temps de quelques années et ces pôles peuvent s'inverser à l'échelle de temps géologique (de l'ordre d'un demi-million d'années).

D'après des observations portant sur diverses espèces d'oiseaux chanteurs, ces volatiles utilisent le soleil couchant

afin d'étalonner leur compas magnétique lors d'une migration nocturne. En 2004, le naturaliste américain William Cochran, Martin Wikelski, de l'Université de Princeton, et Henrik Mouritsen, de l'Université d'Oldenburg en Allemagne, ont exposé des grives à dos olive (*Catharus ustulatus*) migrant vers le Nord à un champ magnétique modifié, au moment du coucher du soleil. Ils ont ensuite lâché huit oiseaux munis d'un radio-émetteur au-dessus des plaines de l'Illinois. Avec un peu de chance et grâce à un bon chauffeur, ils ont pu les suivre en voiture équipée d'un récepteur adéquat. La première nuit, sous l'effet du champ magnétique modifié, les oiseaux ont changé de cap, mais ont repris leur route migratoire la nuit suivante. Ainsi, les oiseaux se sont fiés à la direction du champ magnétique par rapport au soleil couchant et ont modifié leur cap en conséquence durant la première nuit ; la seconde nuit, les oiseaux ont réajusté leur boussole d'après leur compas solaire et volé dans la bonne direction.

Rachel Muheim, de l'Université de Lund, en Suède, et ses collègues ont récemment suggéré qu'avant de migrer, les oiseaux se fient davantage à leur compas solaire ou stellaire, alors que durant la migration ils se fient davantage à leur boussole magnétique et étalonnent en conséquence leurs repères célestes, lesquels se modifient au cours du déplacement. R. Muheim note que quand les oiseaux peuvent voir l'ensemble du ciel au moment du coucher du soleil, comme dans le cas des grives à dos olive, ils étalonnent leur boussole magnétique par rapport à la lumière du ciel, que ce soit avant ou pendant la saison migratoire. Ces conclusions restent cependant débattues et d'autres études de terrain seront nécessaires pour trancher.

De nombreux travaux ont ainsi clairement établi que divers animaux sont sensibles au champ magnétique terrestre et l'utilisent pour s'orienter. Les biologistes poursuivent ces études afin de préciser les caractéristiques de l'orientation et de la navigation de telle ou telle espèce. Cependant, une autre question importante se pose : quels sont les mécanismes et les structures anatomiques responsables de la perception du champ géomagnétique ? La réponse à cette question est encore largement inconnue.



5. Des langoustes de Cuba capturées au Sud de la Floride (*pastille bleue*) ont été soumises à un champ magnétique artificiel reproduisant celui régnant en un point situé à environ 400 kilomètres au Nord (*pastille*



rouge) ou au Sud (*pastille jaune*) du site de capture. Dans les deux cas, les langoustes se sont dirigées vers leur habitat récifal d'origine, ce qui indique un sens de l'orientation utilisant le champ magnétique terrestre.

La première découverte d'un organisme qui s'oriente en fonction du champ magnétique fut celle de bactéries magnéto-tactiques, en 1975. Il semble que ces micro-organismes s'enfoncent dans la vase en suivant les lignes de champ magnétique et trouvent ainsi le milieu le plus favorable à leur développement. Ces bactéries sont pourvues d'organites spécialisés, nommés magnétosomes, des vésicules contenant des cristaux de magnétite et alignées en chapelets (voir la figure 6). La magnétite est de l'oxyde de fer (Fe_3O_4), où, selon la taille et la forme des particules, les moments magnétiques des atomes adjacents adoptent une même direction et forment ainsi des domaines aimantés. Les particules de taille moyenne comprise entre 1,2 et 0,05 micromètre présentent un domaine unique, un « monodomaine », et agissent comme un aimant permanent. Pour un chapelet de particules, les moments magnétiques des particules s'additionnent, ce qui confère à la structure une bonne sensibilité à l'orientation du champ magnétique. Cependant, les cristaux de magnétite auraient tendance à s'agglomérer et non à s'assembler en chapelet s'ils n'étaient pas maintenus en place par quelque autre mécanisme. De plus, le chapelet doit être ancré d'une certaine façon à la cellule.

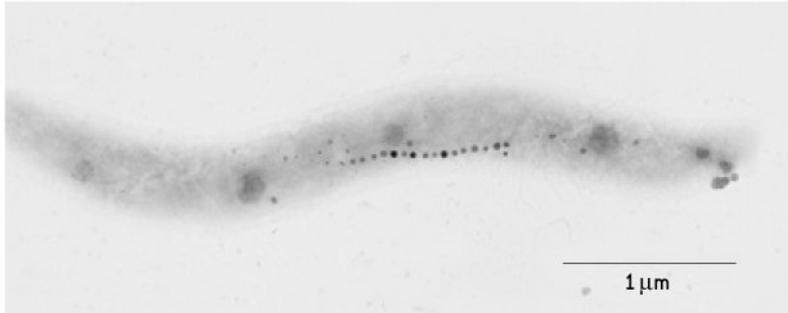
En 2005, l'équipe de Dirk Schüler, de l'Institut Max Planck de microbiologie marine à Brême, en Allemagne, a prouvé par des techniques génétiques qu'une protéine nommée MamJ est essentielle à l'alignement des magnétosomes. Selon leur hypothèse, cette protéine fixe les magnétosomes le long de filaments appartenant au cytosquelette, un peu comme des perles enfilées sur un fil ; en se minéralisant, les magnétosomes commencent à s'attirer magnétiquement et se rapprochent, tout en restant fixés au filament, d'où la formation d'un chapelet de magnétosomes.

Des nanocristaux de magnétite

De telles microstructures magnétiques assurent-elles aussi la perception du champ géomagnétique chez les animaux ? Il y a quelques années, vers 2000, Nikolai Petersen et ses collègues, des Universités de Munich et de Francfort, ont mis en évidence des nanocristaux de magnétite (de moins de 0,01 micromètre), regroupés en amas de un ou deux micromètres de diamètre, dans le tissu qui recouvre la partie supérieure du bec des pigeons domestiques. Ces minuscules cristaux, trop petits pour avoir une aimantation permanente, sont dits superparamagnétiques (le champ géomagnétique ne peut pas faire tourner de tels cristaux ; en revanche, leur moment magnétique peut s'aligner avec un champ externe tout en laissant immobile le cristal).

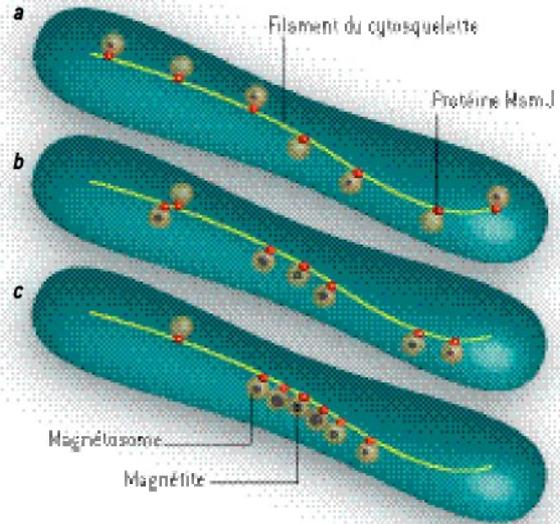
Les chercheurs ont localisé ces structures superparamagnétiques dans des terminaisons nerveuses du nerf trijumeau, qui innerve la partie supérieure du bec. Le rôle de ce nerf dans la perception du champ magnétique a d'ailleurs été prouvé par d'élégantes expériences effectuées en 2004 par Cordula Mora et ses collègues, de l'Université d'Auckland. Notamment, des pigeons entraînés à détecter la présence ou l'absence d'une certaine anomalie de champ magnétique (un champ artificiel de 189 microteslas avec une inclinaison de -80 degrés, contre 44 microteslas et -64 degrés pour le champ géomagnétique) en sont devenus incapables après que leur nerf trijumeau a été sectionné.

1/2
PUB



Damien Faivre, Institut Max Planck de microbiologie marine, Brême

6. Les bactéries magnétotactiques (ici *Magnetospirillum gryphiswaldense*) contiennent des alignements de magnétosomes, vésicules contenant des cristaux de magnétite et responsables de la sensibilité au champ magnétique. Une protéine nommée MamJ semble jouer un rôle important dans la formation de ces structures. On suppose que cette protéine maintient les magnétosomes fixés à un filament (en vert sur les schémas) du cytosquelette. Au début (a), des vésicules se fixent au filament grâce à la protéine (en rouge). Certaines forment des cristaux de magnétite qui, en grossissant (b), finissent par s'attirer les uns les autres et constituer un chapelet de magnétosomes alignés (c).



Pour La Science d'après A. Scheffé et al., Nature, vol. 440, 2006

Chez d'autres oiseaux, des chercheurs ont trouvé de la magnétite monodomaine dans les cavités orbitales et nasales. Mais qu'il s'agisse de magnétite monodomaine ou de magnétite superparamagnétique, on ignore les mécanismes neurophysiologiques dans lesquels ces cristaux interviendraient. Par ailleurs, il est possible que certaines boussoles animales ne soient pas fondées sur de la magnétite, mais sur des réactions chimiques que le champ géomagnétique module. Un modèle théorique d'un tel mécanisme a été proposé en 2000 par le biophysicien Thorsten Ritz et ses collègues, à l'Université de l'Illinois à Urbana-Champaign, aux États-Unis. Il met en jeu des paires de radicaux (une telle paire est un couple de molécules chargées, maintenues dans une cage de molécules de solvant) dont les états de spin peuvent basculer d'un état A à un autre B à la suite de l'absorption d'un photon. Le champ géomagnétique modifierait l'équilibre de cette réaction réversible, c'est-à-dire qu'il modifierait, selon sa direction, le taux de réactions de l'état A à l'état B par rapport à celui des réactions allant de B à A.

Ce principe de perception est peut-être à l'œuvre chez les oiseaux où la boussole magnétique, sensible à l'inclinaison du champ géomagnétique, réagit aussi à la lumière. De telles boussoles ont fait l'objet d'expériences réalisées par l'équipe de W. et R. Wiltschko. Ainsi, le rouge-gorge européen était incapable de s'orienter dans l'obscurité, mais les oiseaux dont on avait occulté l'œil gauche s'orientaient dans la même direction que ceux dont la vision n'était pas entravée. En revanche, les oiseaux dont l'œil droit était obstrué étaient désorientés. Le système sensoriel périphérique faisant office de boussole d'inclinaison pourrait donc être localisé dans la rétine de l'œil droit et ses informations traitées dans l'hémisphère gauche du cerveau. En 2004, H. Mouritsen et ses collègues ont découvert des cryptochromes, des pigments photosensibles, dans des cellules ganglionnaires actives de la rétine de fauvettes de jardin migratrices, qui sont des candidats possibles à la formation de paires de radicaux.

Quoi qu'il en soit, il reste beaucoup à apprendre sur la façon dont les animaux perçoivent le champ magnétique. Il en est de même pour l'utilisation qu'ils en font. Par le

passé, de nombreuses expériences ont été compromises par la nécessité de travailler sur des animaux en captivité. Avec les récepteurs GPS (*Global Positioning Satellite* ou système de localisation par satellite), il est devenu possible de suivre des animaux en milieu naturel sur de grandes distances. Mon équipe à l'Institut Smithsonian de recherches tropicales a ainsi utilisé des équipements standards de marine pour suivre des libellules et des papillons migrateurs individuels, en traversant en bateau, à l'allure des insectes, le canal de Panama ou la mer des Caraïbes. Les pigeons domestiques et les oiseaux nicheurs côtiers sont assez grands pour être équipés d'enregistreurs de données GPS, et les tortues marines, les faucons et autres oiseaux de proie sont de taille suffisante pour qu'on puisse les équiper d'un système de suivi par satellite. Même des libellules ont été munies d'émetteurs radio et suivies en avion. À l'aide de suivis sur une longue durée, les scientifiques espèrent ainsi élucider quelques-uns des mystères de cet extraordinaire sens de l'orientation dont font preuve les espèces migratrices, un sens de l'orientation dont l'un des ingrédients essentiels est le champ magnétique terrestre.

Robert SRYGLEY est chercheur au Département de zoologie de l'Université d'Oxford, en Grande-Bretagne, ainsi qu'à l'Institut Smithsonian de recherche tropicale, au Panama.

K. J. LOHMANN et C. M. F. LOHMANN, *Sea turtles, lobsters, and oceanic magnetic maps*, in *Marine and Freshwater Behaviour and Physiology*, vol. 39(1), pp. 49-64, 2006.

R. MUHEIM et al., *Calibration of magnetic and celestial compass cues in migratory birds – a review of cue conflict experiments*, in *Journal of Experimental Biology*, vol. 209, pp. 2-17, 2006.

5. JOHNSEN et K. J. LOHMANN, *The physics and neurobiology of magnetoreception*, in *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 6, pp. 703-712, 2005.

5. D. CAIN et al., *Magnetic orientation and navigation in marine turtles, lobsters, and mollusks: concepts and conundrums*, in *Integr. Comp. Biol.*, vol. 45, pp. 539-546, 2005.

W. WILTSCSKO et R. WILTSCSKO, *Magnetic orientation and magnetoreception in birds and other animals*, in *J. Comp. Physiol.*, vol. 191, pp. 675-693, 2005.