

La magnétoréception

Noms des membres du groupe

Rida Boumris

Louis-Émile Lalonde

Lixiao Wang

Jules Salvat

Département de physique, Université de Montréal

Session H22-2022

PHY 1441

Soumis le 29/04/2022

RÉSUMÉ

Notre projet porte sur la magnétoréception. La magnétoréception est l'habilité de certains êtres vivants à détecter l'intensité et/ou l'orientation d'un champ magnétique. Elle peut prendre plusieurs formes comme l'électroréception chez les poissons. Grâce à leur ampoule de Lorenzini, certains poissons sont capables de détecter des changements de potentiel électrique. Chez les requins, la capacité à détecter des champs géomagnétiques se manifeste par le biais de récepteur purement magnétique, tandis que les anguilles utilisent leur compas magnétique pour se souvenir de la direction magnétique des courants. Finalement, les oiseaux sont assez atypiques puisque dans leur cas, la magnétoréception peut prendre de différentes formes. Le champ magnétique leur sert autant de boussole d'inclinaison que de carte pour se repérer.

MOTS CLÉS

Magnétoréception, Navigation GPS, Poissons cartilagineux, Oiseaux, Cryptochrome, Magnétite

INTRODUCTION

L'idée qu'un animal puisse détecter le champ magnétique terrestre était jugée comme ridicule pendant bien des années. La faible intensité du champ géomagnétique porte à croire qu'il serait difficile, voire impossible à détecter pour des animaux individuels. De plus, aucun mécanisme biologique connu il y a un demi-siècle par la science ne permettait à un organisme d'extraire de l'information d'un champ magnétique et de convertir celle-ci en signal électrique. Au fil des années, de plus en plus d'études menées en chimie, physique, biologie et à l'intersection de ces trois disciplines ont permis d'accumuler les preuves comme quoi la magnétoréception est bel et bien un phénomène réel. Cependant, l'étude de ce mécanisme chez différentes espèces porte son

lot d'épreuves. En effet, ce phénomène n'est l'extension d'aucun sens chez l'être humain, comme le sont d'autres sens non-humains comme la vision UV. La littérature scientifique de physiologie et biologie humaine n'est donc pas d'une grande utilité pour défricher le sujet. Une autre difficulté se trouve dans le fait que les tissus biologiques laissent passer les champs magnétiques avec très peu de résistance. Le ou les organes de détection chez un animal ne sont donc pas nécessairement en surface et peuvent se trouver n'importe où dans le corps. De plus, l'existence de larges structures ou organes pour détecter le champ magnétique est improbable, car très peu de matériaux d'origines biologiques peuvent influencer le champ en l'amplifiant ou en le concentrant, comme le font le tympan et le cristallin avec le son et la lumière. Évidemment, les scientifiques ne manquent pas de théories pour expliquer ce phénomène, qui prend des formes très différentes pour chaque animal chez qui on l'observe. De façon générale, le champ magnétique fournit différentes informations aux animaux, qui s'en servent principalement pour s'orienter et naviguer dans leur environnement.

Magnétoréception chez les poissons

La magnétoréception se présente chez les poissons comme un moyen évolutionnaire qui sert principalement à détecter le champ magnétique terrestre (champ géomagnétique). La magnétoréception et ses organes récepteurs peuvent être considérés parmi les plus vieux systèmes sensoriels chez les poissons. Ce système leur permet principalement de déterminer l'intensité et l'orientation du champs magnétique terrestre (qu'on considère statique) dans le cas des poisson cartilagineux (requins, raies, etc.). La magnétoréception leur sert d'outil de navigation

Magnétoréception indirecte utilisant l'électroréception

L'électroréception est une particularité sensorielle qui existe chez quelques espèces de poissons qui leur permet de détecter le changement de potentiel électrique à l'aide d'un organe qui s'appelle "l'ampoule de Lorenzini" [1]. Ce changement est une conséquence du mouvement du poisson dans le champ terrestre. Ces espèces de poissons sont en particulier : requins, raies et autres poissons cartilagineux.

Les poissons cartilagineux prennent avantage de leur capacité à créer un champ électrique afin de détecter la variation de potentiel dans leurs proies à l'aide de leurs organes électrorécepteurs. En plus, les poissons cartilagineux peuvent détecter le champ magnétique terrestre en mesurant le potentiel électrique créé lors de leurs déplacements dans celui-ci. Ce phénomène peut être expliqué du fait que les poissons sont considérés comme des conducteurs en mouvement dans le champ terrestre et d'après la loi de Faraday (induction magnétique) qui stipule que la différence par rapport au temps du flux du champ magnétique à travers une surface crée une différence de potentiel électrique entre les bornes du conducteur, qui est, dans notre cas, l'Ampoule de Lorenzini.

Cependant, la majorité des poissons cartilagineux ne portent pas des organes purement magnétiques, ils détectent la variation du champ magnétique terrestre à l'aide des effets électriques (potentiel induit) au lieu de le détecter directement. Or des études portées sur des requins ont montré que le requin gris possède des organes de magnétoréception qui lui permettent de détecter le champ magnétique terrestre d'une façon directe.

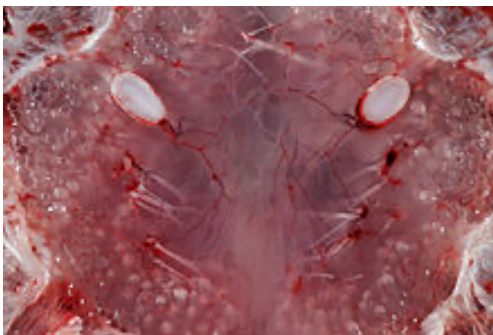


Figure 1 : image montrant l'organe "Ampoule de Lorenzini " chez les requins

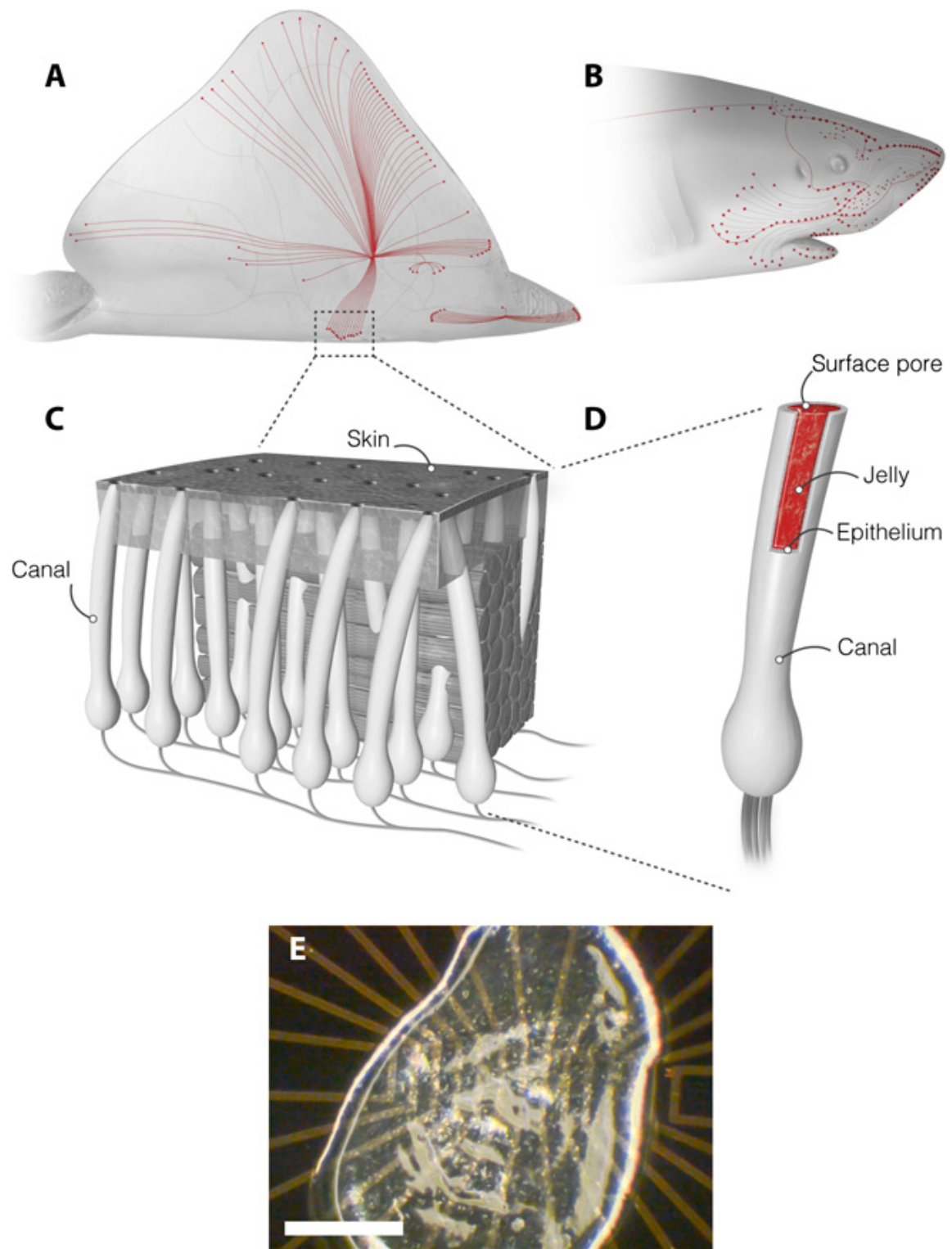


Figure 2 [4] : circuit électro-récepteur chez les requins : A-B le requin détecte les faibles champs électriques de sa proie. (C) 'AoL' réseau des organes électro-sensoriels. (D) une Ampoule ne Lorenzini individuelle. (E) Un échantillon de 'AoL'

Magnétoréception chez les requins

En Floride, des scientifiques ont expérimenté avec un petit groupe de requins (requin bonnet, Bonnet Head Shark) en les exposant à un champ magnétique d'une magnitude similaire à celle se trouvant dans la partie sud par rapport à leur milieu où ils étaient capturés [2]. Les requins ont commencé à suivre une orientation vers le nord à la suite de ce changement du champ magnétique ce qui est clairement un indice référant aux tendances des requins à utiliser le champ magnétique comme un GPS.

Dans un autre contexte des observations ont été faites afin de repérer le trajet d'un grand requin blanc [3] dans sa migration entre l'Afrique du Sud et l'Australie (aller-retour). Le trajet observé ressemblait à une ligne droite, ce qui démontre l'effet du champ magnétique sur l'orientation du requin.

Dans d'autres expériences, des requins ont été placés dans des milieux fermés similaires à leur environnement habituel. En effectuant des changements du champ magnétique (les autres facteurs sont maintenus constants : lumière, températures ..etc.) [3], les scientifiques ont constaté que le requin gris s'adapte à ce changement et manifeste des comportements particuliers; les requins se regroupent au nord magnétique du réservoir, une orientation différente que celle de leur trajet naturel.

Plusieurs expériences ont été réalisées : Meyer *et al.*, **2005** et Anderson *et al.* (**2017**) qui renforcent l'hypothèse de l'existence d'une capacité chez les requins (requins gris / Sandbar sharks) à détecter le champ géomagnétique non seulement par l'intermédiaire des effets électriques (électrorécepteurs), mais aussi à l'aide des récepteurs purement magnétiques.

Magnétoréception chez les anguilles

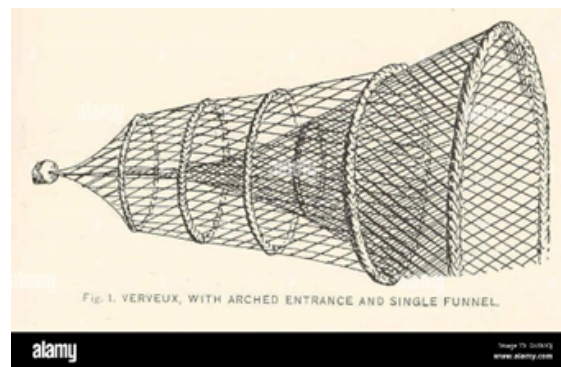
La première étude du comportement des anguilles dans des champs magnétiques consistait à mettre une civelle (espèce d'anguille aussi appelé anguille d'Europe) dans un labyrinthe. Les anguilles ont répondu au changement du champ magnétique en changeant la direction dans laquelle elles se dirigeaient. Les réactions des anguilles étaient aléatoires quand le champ

terrestre était compensé par des bobines de Helmholtz. [5] Les résultats ont par la suite été répétées par plusieurs études comme « Orientation of elvers of American eels (*Anguilla rostrata*) in weak magnetic and electric fields » [6] et « Sensitivity of American Eels (*Anguilla rostrata*) and Atlantic Salmon (*Salmo salar*) to Weak Electric and Magnetic Fields » [7] pour confirmer les résultats.

Des études sur les anguilles ont également été faites dans des grandes étendues d'eau. Après avoir été relâchées dans la mer, les anguilles ont commencé à nager vers le nord, puis vers l'ouest pour rejoindre la mer des Sargasse. [8] Les même chercheurs ont aussi remarqué qu'inverser la composante horizontale du champ géomagnétique à un faible degré conduit à un changement directionnel des anguilles, qui ne se dirigeaient plus vers l'ouest mais vers l'est. Ce qui fut confirmé en 1985 par Karlsson [9].

Ensuite, une étude a permis de confirmer que les anguilles peuvent aussi changer de direction entre le nord et le sud. [10] Lorsque des anguilles sont placées dans un aquarium, elles ont tendance à se déplacer en direction nord, par un champ géomagnétique et par un champ de double intensité. Un changement de la direction des champs a pour conséquence que les anguilles décident de se déplacer vers le sud. Ce qui indique que les anguilles possèdent une boussole magnétique.

Une bonne connaissance de la magnétoréception peut s'avérer très utile dans certains cas. Par exemple, des chercheurs ont réussi à attraper entre 70% et 90% [11] plus de poisson en utilisant la magnétoréception des poissons pour les attirer dans des pièges et des verveux.



Un verveux est un filet de pêche en forme de nasse.

Magnétoréception chez les oiseaux

Chez les oiseaux, la magnétoréception prend la forme de deux types de réponses au champ magnétique terrestre : une boussole magnétique permettant à l'animal de s'orienter et une carte d'intensité magnétique leur servant de repère.

Caractéristiques de la boussole magnétique

L'existence d'une boussole magnétique chez les oiseaux a été démontrée expérimentalement pour la première fois en 1966 chez le rouge-gorge européen et chez de nombreuses autres espèces depuis [16]. Les observations expérimentales ont permis de trouver trois caractéristiques principales de la boussole magnétique des oiseaux. Tout d'abord, il s'agit d'une boussole d'inclinaison qui n'est pas sensible à la polarité du champ magnétique. L'inversion de la composante verticale du champ a le même effet sur l'animal que l'inversion de la composante horizontale. Une inversion des deux composantes ne produit aucun effet chez l'oiseau. Cette boussole leur permet donc de savoir s'ils se dirigent vers l'équateur (lignes de champ inclinées vers le haut) ou vers un pôle (lignes de champ inclinées vers le bas) [13]. Ensuite, la boussole est sensible seulement sur des petits intervalles d'intensité magnétique. Des champs d'intensités beaucoup plus grandes ou plus petites empêcheront les oiseaux de s'orienter. De plus, cet intervalle n'est pas fixe. Par exemple, des rouges-gorges gardés dans un champ magnétique local de 0.46 Gauss pouvaient s'orienter dans un champ magnétique de 0.43 G et 0.54 G, mais devenaient désorientés dans des champs de 0.16, 0.34, 0.6, 0.81 et 1.5 G [16]. La troisième caractéristique de la boussole magnétique est qu'elle requiert une lumière à courte longueur d'ondes. En effet, les oiseaux s'orientent très bien dans une lumière allant jusqu'à 565 nm [13] mais sont complètement désorientés dans une lumière jaune (572-609 nm) ou rouge (630 nm) [16]. D'ailleurs, le zoologiste William Keeton observe que les pigeons voyageurs sont incapables de s'orienter correctement lorsqu'il fait beau, mais qu'ils naviguent correctement lorsque le ciel est couvert. On comprend que l'intensité de la lumière joue aussi un rôle dans la navigation des oiseaux [12].

Théorie du phénomène

N'importe quel modèle théorique voulant expliquer ce phénomène biophysique doit donc prendre en compte les trois caractéristiques mentionnées ci-haut. Présentement, le mécanisme de paires de radicaux est celui qui est le plus probable pour l'influence d'un champ magnétique faible sur des procédés chimiques [15]. En chimie du spin, les radicaux sont des molécules possédant un nombre impair d'électrons et qui ont donc un spin d'électron non apparié qui peut se retrouver dans deux configurations possibles. Après avoir été excitée par un photon, une molécule peut transférer un électron à une autre molécule, créant une réaction intermédiaire de courte durée où deux radicaux sont formés en tandem. Le spin de chaque électron devient intriqué à l'autre, formant ainsi un triplet (spins parallèles) ou un singulet (spins antiparallèles) [15]. Puisqu'un moment magnétique est associé à chaque spin, l'interconversion entre singulets et triplets peut être influencée par un champ magnétique externe dans l'intervalle avant que chaque molécule ne revienne à son état initial (par re-transfert d'électron, par exemple). Puisque le ratio de singulets/triplets dépend de l'orientation du champ magnétique et non de sa polarité, on retrouve ainsi la boussole d'inclinaison détectée expérimentalement [13]. Chez les oiseaux, les sites de réceptions se trouveraient dans la rétine, puisque la lumière y est abondante et que les yeux couvrent toutes les directions spatiales [12]. La cryptochrome, une flavoprotéine, a été proposée comme molécule de magnétoréception, car elle est le seul photorécepteur chez les vertébrés permettant la création de paires de radicaux de longue durée sous excitation par photon, selon nos connaissances actuelles. De plus, cette protéine absorbe justement la lumière à des longueurs d'ondes allant jusqu'à 560 nm, ce qui correspond à l'intervalle de sensibilité détecté. La structure et l'emplacement exactes de cette protéine chez les oiseaux restent inconnues, mais des avancées récentes sur le sujet porte à croire que la molécule Cry4 est la meilleure candidate pour le phénomène [14].

Une carte magnétique

Ainsi, beaucoup de preuves mènent à croire que les oiseaux se servent de l'inclinaison des lignes du champ magnétique terrestre pour s'orienter. Cependant, cette information n'est pas suffisante pour naviguer précisément comme le font les oiseaux et de façon constante à chaque cycle de migration. Il a été démontré que les pigeons voyageurs peuvent détecter une fluctuation naturelle du champ géomagnétique d'environ 20 nanotesla [13]. Pour se servir de ces paramètres

d'inclinaison et de déclinaison, les oiseaux devraient être capable de les référencier à d'autres paramètres non magnétiques, ce qui compliquerait beaucoup leur tâche. Il est donc probable que l'information directionnelle magnétique s'imprègne dans une carte multisensorielle chez l'animal, qui la développe avec le temps, à force d'expérience. Pour enregistrer les fluctuations magnétiques, des particules magnétiques permanentes doivent faire partie de la physiologie de l'animal. Un phénomène démontrant que les oiseaux ont une « permanence » magnétique sensorielle est celui-ci de la réponse à direction fixe [13]. Dans des conditions lumineuses qui perturbent la boussole d'inclinaison normale, telle que la noirceur totale, les oiseaux migratoires démontrent une préférence d'orientation dans une direction qui n'est pas celle correspondant à leur trajet migratoire habituel. Cette direction ne change pas avec les saisons et semble provenir d'une réponse de polarisation au champ géomagnétique [13]. Une anesthésie de la peau de la partie supérieure du bec a supprimé cette réponse, ce qui porte à croire que le magnétorécepteur à base de magnétite se trouve dans cette région. Quant à la nature précise de ce mécanisme et la position du récepteur chez l'animal, les scientifiques ne savent pas encore et plusieurs recherches ne sont pas concluantes. Par exemple, les anesthésies faites sur la peau du bec des oiseaux migrants ne sont pas très spécifiques et la durée de l'effet ne correspond pas toujours avec la durée des fluctuations magnétiques induites pour analyser le sens d'orientation de l'animal [13].

CONCLUSION

En conclusion, les recherches scientifiques ont permis de montrer que les poissons et les animaux sont bel et bien capables de s'orienter, grâce à la magnétoréception plus ou moins directe, qui mobilise des organes et des organismes plus ou moins différents. Nous ne savons pas encore précisément pourquoi un tel phénomène existe, mais cela a sûrement permis à ces animaux d'être plus compétitifs dans la sélection naturelle.

RÉFÉRENCES

- [1] Wikipedia , Magnetoreception
- [2] The Guardian , Sharks use Earth’s magnetic field as ‘GPS’ guidance system, study says.
Richard Luscombe
- [3] Magnetoreception in fish , [Krzysztof Formicki, Agata Korzelecka-Orkisz, Adam Tański](#) , mai 2019 ,
Wiley online library
- [4] Sciences advances , Proton conductivity in ampullae of Lorenzini jelly . [ERIK E. JOSBERGER](#) _____
[PEGAH HASSANZADEHYINGXIN DENG](#) _____ [JOEL SOHN](#) _____ [MICHAEL J. REGOCHRIS T. AMEMIYA](#) _____
AND [MARCO ROLANDI](#) . vol 2 ,issue 5 , mai 2016
- [5] Branover GG, Vasilyev AS, Gleizer SI, Tsinober AB, “A study of the behavior of the eel in
natural and artificial magnetic fields and an analysis of it's reception mechanism”, (1971)
<https://www.emf-portal.org/en/article/21351>
- [6] Zimmerman, M.A., McCleave, J.D. Orientation of elvers of American eels(*Anguilla rostrata*)
in weak magnetic and electric fields. *Helgolander Wiss. Meeresunters* **27**, (1975).
<https://doi.org/10.1007/BF01611805>
- [7] S.A. Rommel, McCleave, J.D. Sensitivity of American Eels (*Anguilla rostrata*) and Atlantic
Salmon (*Salmo salar*) to Weak Electric and Magnetic Fields , (1973)
[https://www.researchgate.net/publication/237179251_Sensitivity_of_American_Eels_Anguilla_r
ostrata_and_Atlantic_Salmon_Salmo_salar_to_Weak_Electric_and_Magnetic_Fields](https://www.researchgate.net/publication/237179251_Sensitivity_of_American_Eels_Anguilla_rostrata_and_Atlantic_Salmon_Salmo_salar_to_Weak_Electric_and_Magnetic_Fields)
- [8] Tesch F.-W. Migratory behaviour of displaced homing yellow eels (*Anguilla anguilla*) in the
North Sea. (1975) <https://hmr.biomedcentral.com/track/pdf/10.1007/BF01611806.pdf>
- [9] Karlsson, L. Behavioural responses of European silver eels(*Anguilla anguilla*) to the
geomagnetic field. *Helgolander Meeresunters* **39**, (1985). <https://doi.org/10.1007/BF01997522>
- [10] Souza JJ, Poluhowich JJ, Guerra RJ. Orientation responses of American eels, *Anguilla*
rostrata, to varying magnetic fields. *Comp Biochem Physiol A Comp Physiol*. 1988;90
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/2900108/>
- [11] Formicki, K. Tański, A. Winnicki, A. EFFECTS OF MAGNETIC FIELD ON THE
DIRECTION OF FISH MOVEMENT UNDER NATURAL CONDITIONS (2002)
<http://old.ursi.org/proceedings/procGA02/papers/p0842.pdf>
- [12] Pinzon-Rodriguez Atticus, Bensch Staffan et Muheim Rachel (2018). Expression patterns of
cryptochrome genes in avian retina suggest involvement of Cry4 in light-dependent
magnetoreception. *J. R. Soc. Interface* **15** :20180058 <https://dx.doi.org/10.1098/rsif.2018.0058>
- [13] Wiltschko R, Wiltschko W (2019). Magnetoreception in birds. *J. R. Soc. Interface* **16**:
20190295 <http://dx.doi.org/10.1098/rsif.2019.0295>

- [14] Günther et al. (2018). Double-Cone Localization and Seasonal Expression Pattern Suggest a Role in Magnetoreception for European Robin Cryptochrome 4. *Current Biology* 28(2), 211–223. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.12.003>
- [15] Rodgers C. T. et Hore P. J. (2009). Chemical magnetoreception in birds: The radical pair mechanism. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106(2), 353-360. <https://doi.org/10.1073/pnas.0711968106>
- [16] Thorsten Ritz, Salih Adem et Klaus Schulten (2000). A Model for Photoreceptor-Based Magnetoreception in Birds. *Biophysical Journal* 78(2), 707-718. [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(00\)76629-X](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(00)76629-X).