

chaque fois qu'un nombre apparaît dans la suite, il est présent au moins N fois d'affilée. Par exemple, la suite 11122233333222 est 3-longue, mais pas 4-longue, puisqu'il n'y a que trois « 1 » d'affilée.

Voici donc le théorème final auquel nous avons abouti avec Rick Moeckel. Considérons le problème des trois corps avec un petit moment cinétique non nul et des masses proches. Alors il existe un grand entier naturel N vérifiant la propriété suivante: pour n'importe quelle suite d'éclipses N -longue, il existe une solution correspondante du problème des trois corps ayant exactement cette suite d'éclipses. Et si la suite est périodique, alors il existe même une solution périodique qui réalise cette suite d'éclipses.

Et ma question originelle? Aucun entier N n'y apparaissait, et j'y recherchais un résultat valide pour toute suite d'éclipses... On était assez loin du compte! En fait, je ne vous ai pas donné ma vraie question. Ce que je voulais vraiment savoir, c'était si l'on pouvait réaliser n'importe quel «type topologique» de courbe périodique, et non toute suite d'éclipses (on peut définir intuitivement le type topologique comme le «motif d'enroulement» de la courbe autour des trous). J'utilisais la suite d'éclipses comme un raccourci pour cette autre notion, en encodant le type topologique dans la suite d'éclipses.

Mais cette représentation d'un type topologique au moyen de sa suite d'éclipses est redondante: beaucoup de suites d'éclipses différentes encodent le même type topologique. Considérons, par exemple, le type topologique «tourner une fois dans le sens antihoraire autour du point 23». La suite d'éclipses 23 représente ce type topologique. Mais c'est aussi le cas des suites 2223, 222223 ou 2333. En effet, chaque fois que l'on traverse deux fois d'affilée l'arc 2, on peut «oublier» ces deux traversées en déformant les méandres, pour faire en sorte que la courbe traverse l'arc deux fois de moins. De cette façon, on supprime toute paire consécutive du même nombre apparaissant dans une suite d'éclipses sans changer le type topologique de la courbe représentée par cette suite. Cette simplification des suites d'éclipses n'a pas de sens physique, car certaines solutions – qui ont donc une réalité physique – ont des suites d'éclipses présentant des répétitions.

Pour répondre maintenant à ma question grâce à notre théorème principal, remarquons qu'en supprimant une à une les paires de nombres égaux consécutifs, on obtient une suite d'éclipses associée au même type topologique de courbe et qui n'a jamais deux nombres égaux consécutifs: elle ne contient pas les motifs 11, 22 ou 33. Nommons une telle suite une «suite admissible». Considérons alors une suite admissible, par exemple 123232.

En cas de moment cinétique nul, la réponse à ma question de départ est «non»

Choisissons un nombre entier impair n supérieur ou égal à l'entier N de notre théorème, et remplaçons la suite admissible par la suite $1^n 2^n 3^n 2^n 3^n 2^n$, prolongée périodiquement, où les exposants signifient ici que l'on répète le nombre (par exemple, $1^3 = 111$). Par construction, cette suite représente le même type topologique que la suite admissible, car n est impair. Notre théorème nous assure que cette nouvelle suite d'éclipses est réalisée par une solution périodique. Cette solution périodique ayant le même type topologique que la suite de départ, on a montré que la réponse à ma question à propos des types topologiques était «oui».

QUELLES PERSPECTIVES?

Il reste encore beaucoup à faire. Quand j'ai posé ma question à propos des types topologiques, il y a vingt ans, je ne m'intéressais qu'à des solutions de moment cinétique nul; or de plus en plus d'indices liés à des travaux menés ces dernières années suggèrent que la réponse à ma question de départ est «non» en cas de moment cinétique nul. Par exemple, on a des raisons de penser que même le type topologique de la suite périodique non vide la plus simple, 23, n'est jamais réalisé par une solution périodique du problème des trois corps avec des masses toutes égales et à moment cinétique nul.

Quant à la version de la question formulée en termes de suites d'éclipses et non de types topologiques, elle reste encore sans réponse, même pour des moments cinétiques non nuls, puisque le théorème ne permet de réaliser que des suites d'éclipses N -longues pour un certain entier N suffisamment grand. Par exemple, nous ne savons absolument pas comment réaliser des suites admissibles.

En fin de compte, nous n'avons peut-être pas beaucoup avancé dans la résolution complète du problème des trois corps, mais, en chemin, nous avons beaucoup appris. Nous allons continuer à chercher, et ce problème sera probablement encore fructueux pour ceux qui s'y intéresseront. Car manifestement, cette énigme classique de l'histoire des mathématiques n'a pas fini de nous étonner. ■

BIBLIOGRAPHIE

R. Moeckel et R. Montgomery, **Realizing all reduced syzygy sequences in the planar three-body problem**, *Nonlinearity*, vol. 28(6), pp. 1919-1935, 2015 (disponible en ligne : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0951-7715/28/6/1919/pdf>).

A. Chenciner et R. Montgomery, **A remarkable periodic solution of the three-body problem in the case of equal masses**, *Annals of Mathematics*, vol. 152(3), pp. 881-901, 2000 (sur arXiv : <https://arxiv.org/pdf/math/0011268.pdf>).

L'ESSENTIEL

> Les anguilles électriques sont des poissons d'eau douce qui chassent à l'électricité.

> Une série d'expériences de laboratoire révèle comment ces animaux se servent d'impulsions électriques pour détecter, paralyser ou tuer leurs proies.

> Ces expériences expliquent aussi pourquoi les décharges électriques que ces poissons infligent à un prédateur en bondissant hors de l'eau sont plus violentes encore que celles qu'elles produisent dans l'eau.

L'AUTEUR



KENNETH C. CATANIA
professeur de biologie
à l'université Vanderbilt,
à Nashville, dans le Tennessee,
aux États-Unis

Les superpouvoirs de l'anguille électrique

Les anguilles électriques produisent des tensions de plusieurs centaines de volts. Comment s'en servent-elles pour se défendre ou pour chasser leurs proies ? Des expériences de laboratoire révèlent les étonnantes adaptations de ces gymnotes.

En Amazonie, certains poissons d'eau douce, les « anguilles électriques », infligent des décharges électriques à d'autres animaux pour les paralyser ou se défendre. Quand j'ai voulu parler de ces poissons à mes étudiants, je me suis rendu compte que nous en savions peu sur leur comportement. J'ai alors acquis quelques anguilles électriques pour mon laboratoire, et ce que j'ai vu alors – des proies soudainement pétrifiées sous l'eau – m'a tellement stupéfait que je me suis précipité dans leur étude ; au point de finir par tendre mon bras à l'une d'entre elles...

Les anguilles électriques semblent dotées d'une sorte de superpouvoir : elles paralysent



Les anguilles électriques émettent des impulsions électriques tant pour repérer des proies, les paralyser et les tuer, que pour se défendre.

© David Liitschwager



leurs proies à distance. Du reste, mon premier réflexe fut de les comparer au Taser, ce pistolet électrique utilisé par les policiers pour immobiliser une personne à distance. Cet appareil crée en effet une incapacité neuromusculaire temporaire en interférant avec le contrôle des muscles par le système nerveux.

Le Taser envoie, à travers des fils, 19 impulsions électriques de forte tension par seconde. Les anguilles électriques n'ont nul besoin de fils, puisque l'eau est conductrice. À ce détail près, leurs impulsions électriques, d'une durée d'environ deux millisecondes chaque, rappellent tout à fait celles d'un Taser. Toutefois, pendant une attaque, elles peuvent en émettre plus de 400 par seconde, donc beaucoup plus qu'un Taser. Les anguilles électriques sont-elles juste des Tasers vivants à l'efficacité augmentée?

C'est avec cette question à l'esprit que j'ai entrepris d'élucider l'attaque de l'anguille et les effets de ses décharges électriques. À chaque étape de mon parcours, j'ai été surpris par son utilisation complexe de l'électricité.

D'IMPRESSIONNANTES DÉCHARGES ÉLECTRIQUES

Les anguilles électriques (qui n'ont pas de rapport de parenté avec l'anguille d'Europe) sont des poissons d'eau douce des eaux amazoniennes. On en reconnaît depuis 2019 trois espèces proches alors qu'auparavant, une seule, *Electrophorus electricus*, était identifiée. Elles appartiennent à la famille des gymnotidés, dont les 41 espèces ont toutes des organes électriques qui leur servent à percevoir l'environnement et à communiquer, par l'intermédiaire de décharges >

> électriques de basse tension. Chez le genre *Electrophorus*, c'est-à-dire les anguilles électriques, ces organes électriques sont devenus capables d'émettre des décharges pouvant dépasser 850 volts de tension, ce qui en fait de véritables armes. Une anguille électrique peut peser plus de 18 kilogrammes et mesurer 2,5 mètres de long. Réparti tout au long du corps, son organe électrique est constitué de milliers d'électrocytes, des cellules particulières en forme de disque qui fonctionnent comme des batteries, chacune d'elles pouvant créer une tension de 0,15 volt.

Pour vérifier que la comparaison avec le Taser était pertinente, je devais observer une anguille chasser. J'ai placé dans son bassin un poisson mort, mais aux nerfs et muscles toujours fonctionnels, et lui ai relié un fil afin de mesurer ses contractions musculaires; ce poisson était protégé de l'anguille par une barrière conductrice. Puis j'ai ajouté des vers de terre dans le bassin, que le gymnote dévorait après les avoir attaqués par décharges électriques.

Les séries de décharges de forte tension de l'anguille provoquaient des contractions musculaires massives dans le poisson quelque trois millisecondes après chaque attaque électrique, un temps que j'avais déjà mesuré en visionnant les vidéos d'attaque au ralenti. Les anguilles électriques sont donc l'équivalent d'un Taser aquatique. Les expériences ont aussi révélé qu'elles n'activent pas directement les muscles des poissons, mais seulement les nerfs qui y mènent. Chaque décharge de forte tension d'une anguille engendre, dans les nerfs moteurs du poisson, ce que l'on nomme un potentiel d'action, c'est-à-dire une impulsion nerveuse.

Cette observation est remarquable si l'on considère que l'organe électrique de l'anguille est un muscle modifié, activé par les propres nerfs moteurs – eux-mêmes activés par le cerveau – de l'animal. Ainsi, pour chaque décharge de forte tension, un signal de commande naît dans le cerveau de l'anguille, court le long de ses motoneurones – ces neurones dédiés à la transmission des signaux du cortex moteur –, active l'organe électrique, qui l'amplifie; puis, en passant à travers l'eau, le signal amplifié parvient aux motoneurones des poissons présents à proximité, dont les muscles se figent. Autrement dit, l'anguille dispose d'une sorte de télécommande mentale qui lui permet de paralyser ses proies à distance!

DOUBLETS ÉLECTRIQUES

Cette conclusion suggère que le fonctionnement des muscles des proies de l'anguille a régi en partie l'évolution de son organe électrique. Cette idée en tête, j'ai étudié de plus près les séries de décharges de forte tension. Les écrits d'un chercheur m'ayant précédé m'avaient en effet intrigué: Richard Bauer avait

établi en 1979 que les anguilles électriques émettent pendant la chasse des paires d'impulsions électriques séparées de deux millisecondes. J'ai pu observer chacune de mes anguilles de laboratoire émettre de tels «doublets électriques». À quoi servent-ils?

Une petite recherche sur la physiologie musculaire m'a révélé que les doublets électriques, ou les paires de potentiels d'action qu'ils créent, provoquent une tension musculaire maximale. Mes observations montraient que les doublets émis par les anguilles entraînent un tremblement soudain du corps de la proie, alors que les séries de décharges paralysent celle-ci de façon continue. Les tremblements convulsifs font vibrer l'eau, ce que l'anguille perçoit. Cela suggérait que l'émission



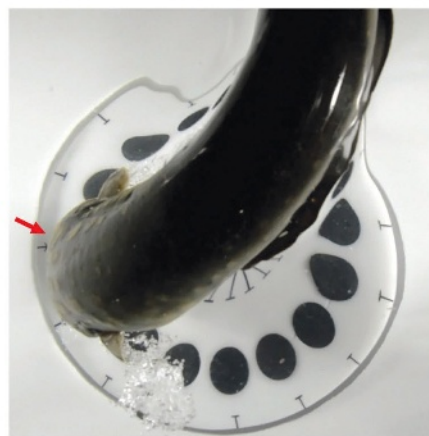
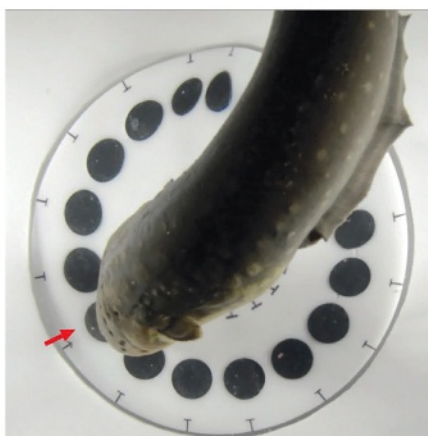
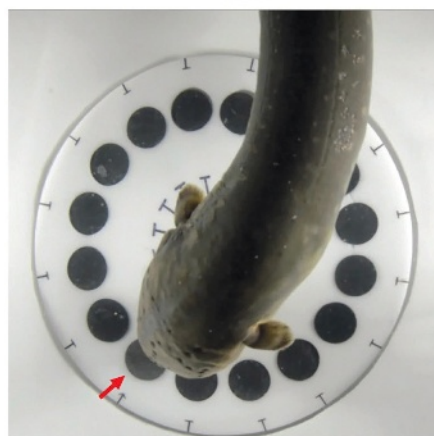
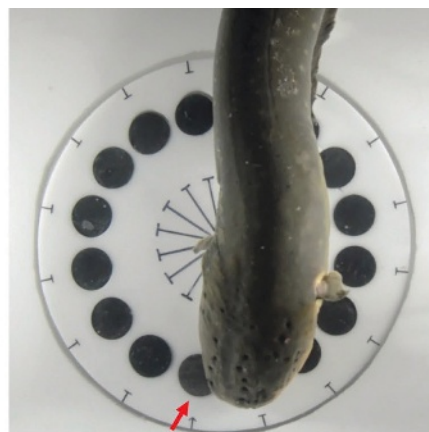
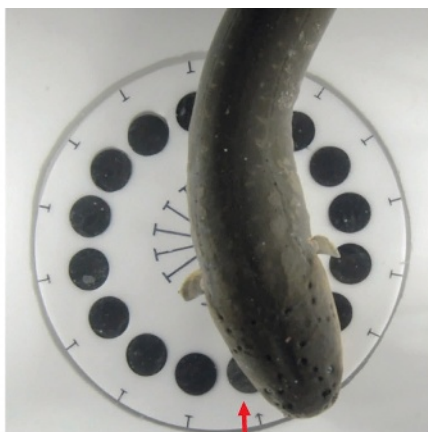
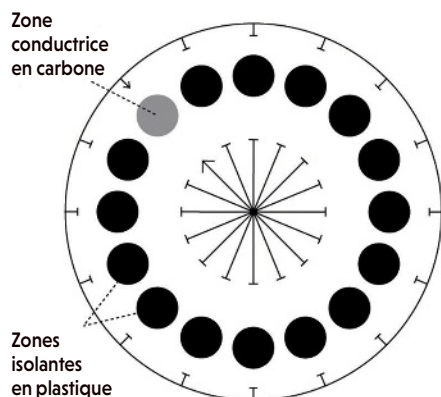
Le gymnote constitue un dipôle électrique, sa tête étant le pôle positif

de doublets par le gymnote est un moyen d'obliger les animaux aquatiques à se trahir. Après tout, les anguilles électriques sauvages chassent la nuit dans les eaux amazoniennes, où elles sont entourées d'une très grande diversité de proies dissimulées, des proies beaucoup plus difficiles à repérer que les vers et poissons rouges que je mettais dans le bassin de mes anguilles.

UNE REDOUTABLE CHASSEUSE

Un fait soutient cette idée: quand les anguilles de mon laboratoire avaient affaire à de nouveaux types de proies, telles des écrevisses, ou à des animaux dissimulés sous les plantes du bassin, elles émettaient souvent des doublets électriques, puis attaquaient après le tremblement de la proie, comme si elles avaient été averties.

Ces observations étaient déjà très éloquentes, mais j'ai voulu avoir une preuve directe. J'ai attaché le poisson mort à un stimulateur électrique déclenchable soit par moi, soit par un doublet électrique de l'anguille, puis l'ai placé dans un sac plastique refermable choisi pour le protéger des doublets du gymnote. Ce dispositif m'a permis de contrôler le moment où les muscles du poisson se contractaient. Or



en l'absence de tremblement du poisson, les gymnotes ne réagissaient pas: ils n'attaquaient que si leurs doublets électriques étaient suivis de convulsions du poisson.

L'anguille électrique utilise donc deux types différents de contrôle à distance qui, à eux deux, en font une redoutable chasseuse: avec l'un, l'anguille force les proies à révéler leur présence, puis, avec l'autre, elle les fige.

Être capable de contrôler un autre animal à distance est déjà spectaculaire, mais les «superpouvoirs» de l'anguille ne s'arrêtent pas là. L'animal sait aussi se servir de son organe électrique pour mettre à mort. Ses décharges électriques ont l'inconvénient de se répartir dans tout le volume d'eau qui entoure le gymnote, de sorte que seule une infime fraction de sa puissance électrique atteint la proie. Comment alors celle-ci est-elle tuée? Le grand physicien anglais Michael Faraday, qui a effectué en 1838 des expériences avec des anguilles électriques, nous a donné la clé pour le comprendre.

Le gymnote constitue un dipôle électrique. En d'autres termes, les lignes représentant son champ électrique émanent de la tête de l'animal, chargée positivement, et se terminent sur sa queue, chargée négativement. La densité de ces lignes en un point donné correspond à l'intensité du champ électrique en ce point;

Des expériences ont montré que l'anguille électrique peut repérer ses proies en émettant des impulsions électriques de tension élevée. Ainsi, elle repère vite et avec précision la seule zone conductrice placée sur ce disque en rotation rapide, même si elle est visuellement indiscernable des autres.

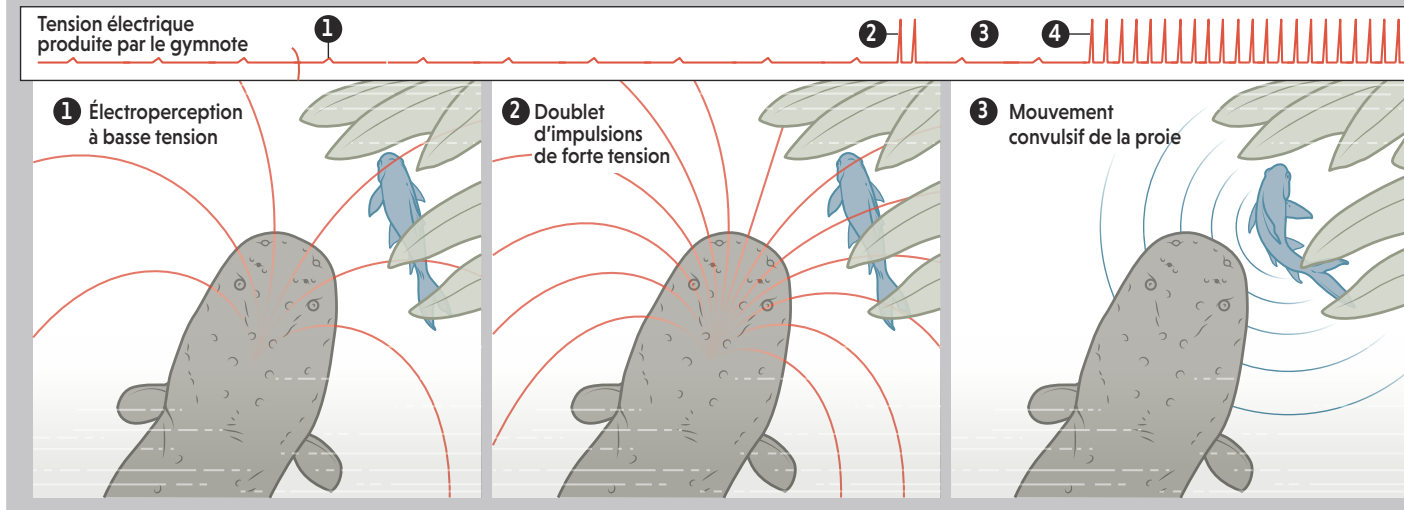
l'intensité est ainsi maximale aux pôles et diminue très vite avec la distance. Or on apprend dans les cours de physique que l'intensité du champ électrique régnant entre les charges d'un dipôle augmente considérablement lorsqu'on rapproche ces dernières. L'anguille électrique semble avoir fréquenté de tels cours, puisqu'elle rapproche ses pôles dès qu'une proie lui résiste: elle la maintient fermement dans sa gueule (pôle positif) et se courbe pour l'envelopper avec sa queue (pôle négatif), avant d'émettre une série de décharges électriques de forte tension.

Pour évaluer les effets de cette manœuvre, j'ai conçu un jouet à mâcher spécial pour anguille électrique: une paire d'électrodes enregistrant la tension et montées sur un support en plastique, le tout placé à l'intérieur d'un poisson mort. Quand les gymnotes prenaient ce dispositif dans leur gueule, je secouais les fils reliés aux électrodes afin de simuler le comportement d'une proie récalcitrante. Les anguilles s'enroulaient alors autour du dispositif et le soumettaient à une très forte tension: le champ électrique reçu par la proie factice était le double du champ électrique produit normalement par les anguilles. Ce comportement permet à l'animal de concentrer sa puissance électrique sur une cible afin de mieux la tuer.

TACTIQUE D'ATTAQUE

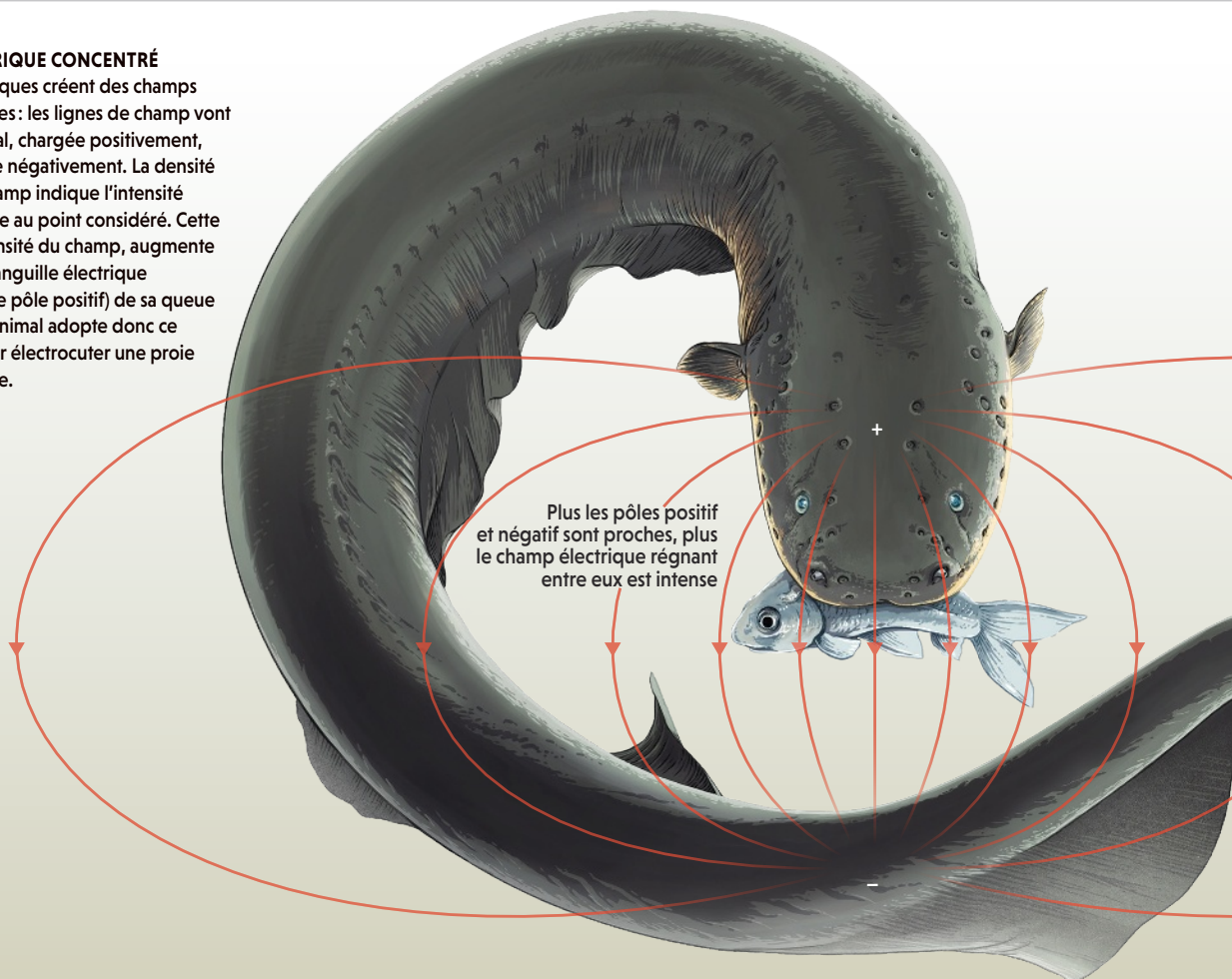
Les anguilles électriques chassent en émettant des impulsions électriques qui neutralisent leurs proies. Ces impulsions activent les motoneurones contrôlant les muscles de la proie, laquelle est ainsi paralysée à distance. À tension élevée, l'organe électrique du gymnote lui permet d'exercer cette forme de télécontrôle de deux façons : soit pour repérer des proies dissimulées en provoquant chez celles-ci

un mouvement convulsif perceptible, soit pour figer ces proies. À tension basse, son organe électrique peut aussi lui servir à suivre à distance les mouvements de ses proies. De plus, l'anguille électrique adopte une posture adaptée pour neutraliser sa proie en milieu aquatique, où la plus grande part de l'électricité des impulsions qu'elle émet se dissipe très vite dans le volume d'eau environnant.



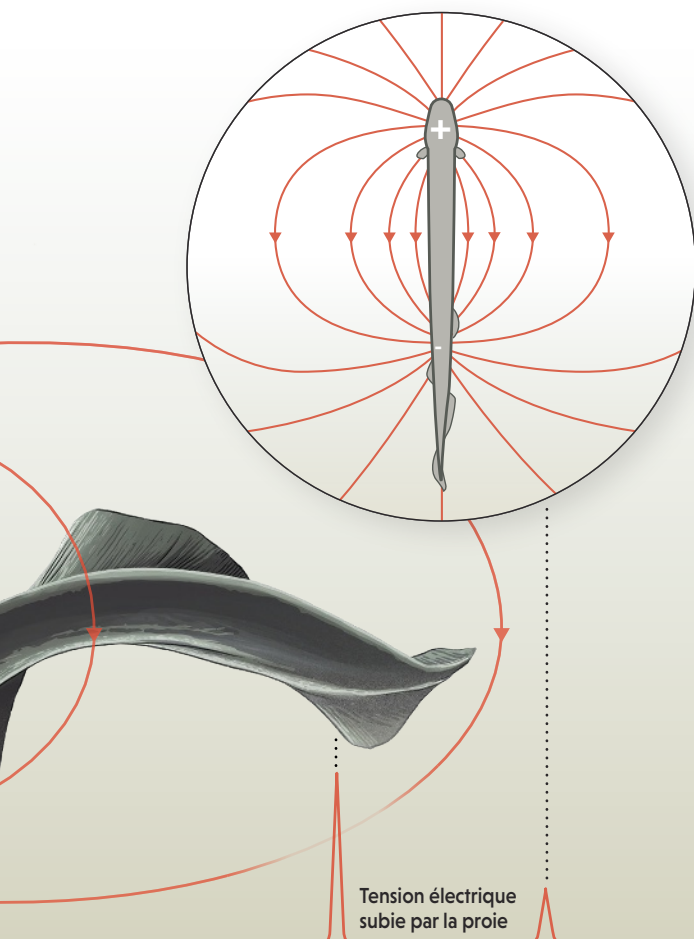
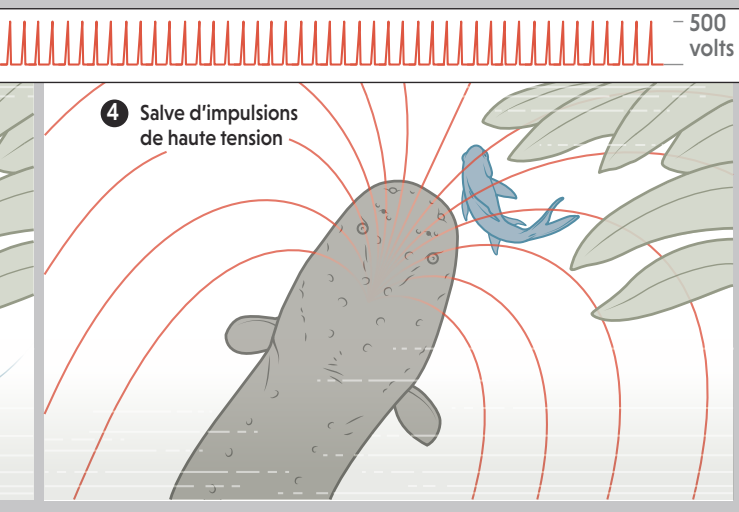
UN CHAMP ÉLECTRIQUE CONCENTRÉ

Les anguilles électriques créent des champs électriques dipolaires : les lignes de champ vont de la tête de l'animal, chargée positivement, à sa queue, chargée négativement. La densité de ces lignes de champ indique l'intensité du champ électrique au point considéré. Cette densité, donc l'intensité du champ, augmente fortement quand l'anguille électrique rapproche sa tête (le pôle positif) de sa queue (le pôle négatif). L'animal adopte donc ce comportement pour électrocuter une proie saisie dans sa gueule.



LES STADES D'UNE MISE À MORT

Pour explorer son environnement, l'anguille peut utiliser son organe électrique soit à tension basse, soit à tension élevée ❶. Afin de détecter une proie dissimulée par la végétation, le gymnote émet des paires d'impulsions à forte tension – les doublets électriques – qui provoquent un mouvement convulsif de la proie ❷. Ce brusque mouvement involontaire fait vibrer l'eau, ce que le gymnote perçoit ❸. La proie étant repérée, l'anguille lance une série d'impulsions à tension élevée afin de la paralyser, pendant qu'elle s'approche pour l'aspirer dans sa gueule ❹.



> Des expériences supplémentaires ont montré que l'attaque amplifiée de l'anguille provoque des contractions musculaires à des fréquences élevées, ce qui épuise la proie en quelques secondes. Le phénomène est l'analogue électrique d'une neurotoxine. L'anguille est ainsi capable de capturer et de maîtriser rapidement des animaux dangereux, de grosses écrevisses munies de pinces par exemple.

PLUS QU'UNE ARME

Lors de mes observations de gymnotes en chasse, j'ai eu l'impression que leurs décharges avaient peut-être d'autres fonctions que les attaques. Lorsqu'une anguille électrique attaque pour tuer, elle émet d'abord une série de décharges de forte tension, puis aspire la proie dans sa gueule. Mais je remarquais que quand le poisson mort se tortillait dans un sac plastique isolant, l'attaque cessait. L'anguille électrique avait émis sa série d'impulsions et frappé le poisson, mais elle interrompait son attaque sans qu'il y ait morsure-succion. Pourquoi?

Jusque-là, je supposais que les attaques des gymnotes suivaient une séquence fixée à l'avance, sans rétroaction sensorielle. Puis il m'est venu à l'esprit que les décharges de forte tension leur servaient aussi à faire de la télé-détection: cela expliquerait pourquoi ils négligeaient les proies entourées de plastique isolant. Après tout, les anguilles électriques ont évolué à partir de poissons utilisant de faibles champs électriques pour sonder leur environnement, et ont manifestement conservé cette faculté. Mais quand la mettaient-elles à profit? Les impulsions de haute tension étaient-elles à l'œuvre pour sonder le milieu? J'ai décidé d'explorer cette possibilité.

Pour ce faire, je me suis servi des propriétés conductrices de la proie et du comportement de chasse de l'anguille. Les animaux vivant dans l'eau douce sont généralement plus conducteurs que l'eau, de sorte qu'une anguille électrique s'intéresse avant tout aux objets conducteurs, qui lui semblent vivants. Gardons toutefois à l'esprit qu'un gymnote peut détecter ces conducteurs grâce à son système électrique à basse tension, qui reste actif jusqu'à ce que ce prédateur passe à l'attaque et aux fortes tensions électriques. Pour mettre en évidence ses perceptions à tension élevée, il me fallait analyser son comportement au ralenti au cours des attaques, quand le système à basse tension n'est pas actif et que seul le système à haute tension l'est.

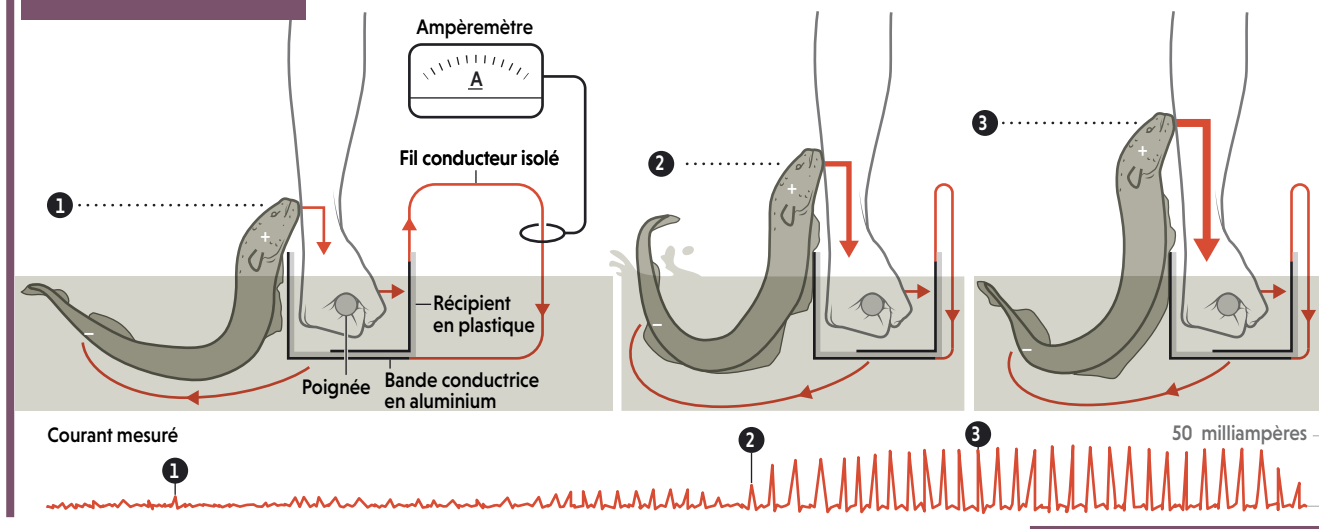
Une première expérience a consisté à ajouter un conducteur inerte (une tige en carbone) dans l'aquarium près du poisson mort se contractant dans le sac refermable. Une fois de plus, l'anguille n'a attaqué que lorsqu'elle a détecté le mouvement de l'eau déclenché par la contraction du poisson et a frappé vers le sac >

LA MEILLEURE DES DÉFENSES

Les anguilles électriques sautent souvent hors de l'eau pour administrer une décharge électrique à ce qu'elles perçoivent comme un agresseur. Afin de mesurer le courant traversant un bras humain pendant ce type d'attaque, l'auteur a conçu un dispositif expérimental

où il présente son propre bras à une anguille juvénile ①. Plus l'anguille s'élève hors de l'eau, plus le courant qui circule habituellement de la tête à la queue est remplacé par un courant, nettement plus fort, qui circule à travers la cible, c'est-à-dire ici le bras ②. Au point culminant du saut

de l'animal, le courant qu'il engendrait a atteint 43 milliampères – une décharge fortement répulsive, qui a déclenché chez l'auteur le réflexe de retirer son bras ③. Les anguilles de grande taille produisent *a priori* des courants nettement plus intenses.



► isolant contenant le poisson mort. Toutefois, elle a changé de cap à mi-chemin et tenté de manger la tige carbone en combinant succion et morsure comme lors de chaque attaque. Comme on pouvait s'y attendre dans le cas où les impulsions de tension élevée lui servent aussi à suivre ses proies, elle semblait interpréter la tige de carbone comme un poisson.

C'était un bon début, mais j'avais besoin de preuves plus solides. J'ai donc réalisé des expériences en plaçant des tiges de carbone et de multiples tiges de plastique afin de prendre en compte la possibilité que l'anguille discrimine les cibles à l'aide de sa vue. Toutes les anguilles ont attaqué le conducteur en carbone par des séries de décharges à tension élevée.

REPÉRAGE RAPIDE ET PRÉCIS

Ma dernière expérience a consisté à présenter aux anguilles électriques un disque en rotation rapide comportant à sa surface une petite zone conductrice et une série de zones isolantes d'aspect identique (voir l'illustration page 39). Les performances des anguilles m'ont impressionné : elles ont pu suivre et attaquer l'élément conducteur, au cours d'une même série d'impulsions à forte tension, avec une précision et une rapidité que l'on n'avait jamais constatées chez les animaux à électroperception active.

Plus aucun doute n'était possible : même aux tensions élevées, l'appareil électrique de

ces gymnotes est non seulement une arme, mais aussi un organe sensoriel permettant de repérer les proies. Le respect que m'inspiraient les anguilles électriques grandissait de jour en jour ; ce qui était bienvenu, puisque j'allais subir l'attaque de l'une d'elles...

DÉFENSE ÉPOUSTOUFLANTE

En mars 1800, le naturaliste prussien Alexander von Humboldt engagea des villageois d'Amazonie pour attraper des anguilles électriques, et décrivit l'opération. Les villageois firent venir une trentaine de chevaux et de mulets, qu'ils forcèrent à entrer dans une mare pleine d'anguilles. Leur but était que les anguilles électriques attaquent les chevaux jusqu'à ce qu'elles soient devenues inoffensives à force de décharger. Deux chevaux moururent dans l'affaire et d'autres, fortement atteints, s'effondrèrent sur la rive.

Le récit, publié en 1807, fit douter certains savants postérieurs à von Humboldt : pourquoi les gymnotes prendraient-ils le risque de s'attaquer à des animaux trop gros pour constituer des proies ? Pendant plus de deux siècles, aucun comportement analogue d'attaque n'a été rapporté – jusqu'au jour où, dans mon laboratoire, je me suis trompé d'épuisette pour attraper une grosse anguille électrique.

En général, les anguilles électriques ne sautent pas hors de leur aquarium, sauf si vous en coincez une en vous en approchant avec un

gros objet conducteur émergeant de l'eau. Elles réagissent alors par une attaque explosive. Ce comportement littéralement choquant m'est apparu lorsque j'ai tenté de capturer une grosse anguille à l'aide d'une épuisette dont le bord et la poignée étaient en métal. Elle s'est retournée et a bondi hors de l'eau tandis que sa mâchoire inférieure restait appuyée contre la poignée métallique et qu'elle émettait une longue série de décharges de forte tension (heureusement, je portais des gants de protection). C'est un comportement défensif que j'ai retrouvé chez toutes les anguilles électriques testées.

En analysant les phénomènes électriques qui ont accompagné le bond de mon anguille, de nombreuses pièces du puzzle biologique et historique se sont mises en place. Si les anguilles interprètent les petits objets conducteurs comme des proies comestibles, elles interprètent comme de gros animaux menaçants les grands objets conducteurs partiellement submergés qui s'approchent. *A priori*, elles pourraient fuir à la nage, mais il se trouve que pendant la saison sèche, elles se voient souvent piégées dans des mares à la portée de prédateurs tels que caïmans ou félins. Ajoutez à ce scénario le fait que les anguilles ne peuvent pas diriger leurs impulsions électriques et vous aurez la recette d'un étonnant mode de défense expliquant le récit de von Humboldt.

DES TESTS AVEC DES BRAS DE ZOMBIE

Pour en savoir plus, je me suis procuré des bras de zombie postiches, que l'on vend aux États-Unis lors des fêtes d'Halloween. Après en avoir retiré le faux sang, j'y ai placé des diodes électroluminescentes de façon à imiter le passage des voies nerveuses, puis j'ai présenté cette nouvelle cible à mes anguilles. Cela a déclenché des bonds défensifs, et les diodes ont d'autant plus clignoté que l'anguille s'élevait loin de l'eau. Comment expliquer cela ?

Répondre à cette question implique de déterminer le circuit électrique équivalent à l'ensemble gymnôte+gros objet conducteur, afin de pouvoir déterminer la tension, ou force électromotrice, de l'organe électrique. Je devais également calculer la résistance électrique des matériaux du circuit. J'ai mesuré chaque variable successivement, en commençant par l'organe électrique de l'anguille. Longue d'un peu plus d'un mètre, la plus grosse anguille de mon laboratoire avait un potentiel électrique de 382 volts et une résistance interne de seulement 450 ohms, ce qui, en l'absence d'autres résistances, donne des intensités de courant de près de un ampère. Clairement, une anguille électrique est plus violente qu'un Taser !

Lorsque l'anguille bondit hors de l'eau en appuyant sa mâchoire inférieure contre une

TROIS ESPÈCES D'ANGUILLES ÉLECTRIQUES

Autour de David de Santana, de la Smithsonian Institution aux États-Unis, une équipe de chercheurs a étudié l'anatomie et l'ADN de 107 anguilles électriques capturées au Brésil, au Suriname, en Guyane française et au Guyana. Les résultats révèlent l'existence de trois populations génétiquement distinctes, donc de trois espèces au lieu d'une seule reconnue précédemment, *Electrophorus electricus*. Celle-ci vit au nord, principalement au Guyana et au Suriname ; *Electrophorus varii* est disséminé le long des basses terres amazoniennes jusqu'au nord du Brésil et en Guyane française ; et *Electrophorus voltai* vit au sud du bassin amazonien, au Brésil.

Les chercheurs ont mis en évidence des différences anatomiques subtiles entre ces espèces, qui se seraient différenciées avec la séparation des trois populations, quand le grand bassin amazonien s'est formé il y a quelque 3 millions d'années. Ils ont aussi établi que *E. voltai* peut produire des tensions de 860 volts, bien plus que les 650 volts cités jusqu'à présent pour les anguilles électriques. C'est un record absolu dans le monde vivant.

cible, le courant qui circule habituellement de la tête vers la queue s'affaiblit, car l'air, mauvais conducteur, tend à l'interrompre, de sorte que c'est le courant à travers la cible qui augmente. Cela explique les impressionnants bonds du gymnôte : plus ils sont hauts, plus l'épaisseur d'air isolant la tête de la queue est grande, et plus l'intensité du courant dans la cible est importante.

Pour préciser les choses, j'ai dû résoudre un exercice de physique élémentaire : calculer le courant électrique dans un circuit comportant deux résistances en parallèle. Il fallait pour cela déterminer chacune de ces résistances. J'ai obtenu la première – celle du corps de l'anguille – en faisant attaquer des gymnôtes une plaque métallique reliée à un voltmètre. L'autre résistance à déterminer était celle du bras postiche servant de cible. Après avoir précisé toutes les autres variables du problème, je suis parvenu à estimer la résistance électrique complexe s'établissant entre la mâchoire de l'anguille électrique, une cible vivante et l'eau baignant l'ensemble.

Je me suis aussi servi de mon propre bras afin de déterminer la dernière variable et de pouvoir tester les résultats de toutes les mesures précédentes. J'ai fait appel à une toute petite anguille présentant une force électromotrice de seulement 198 volts et une résistance interne de 960 ohms, et construit un dispositif capable de mesurer le courant à travers mon bras pendant l'attaque du gymnôte. C'est ainsi que j'ai résolu l'exercice de physique que je m'étais posé et éprouvé dans ma chair à quel point les anguilles électriques sont efficaces quand elles attaquent... ■

BIBLIOGRAPHIE

C. David de Santana et al., **Unexpected species diversity in electric eels with a description of the strongest living bioelectricity generator**, *Nature Communications*, vol. 10, article 4000, 2019.

K. C. Catania, **Power transfer to a Human during an electric eel's shocking leap**, *Current Biology*, vol. 27(18), pp. 2887-2891, 2017.

K. C. Catania, **Electric eels use high-voltage to track fast-moving prey**, *Nature Communications*, vol. 6, article 8638, 2015.

K. C. Catania, **The shocking predatory strike of the electric eel**, *Science*, vol. 346, pp. 1231-1234, 2014.

