



HAL
open science

Vers de nouvelles marques électroniques de suivi despèces marines

Serge Bernard

► **To cite this version:**

Serge Bernard. Vers de nouvelles marques électroniques de suivi despèces marines. CNRS Edition. L'interdisciplinarité. Voyages au-delà des disciplines, CNRS Edition, 2023, 9782271139832. lirmm-04674991

HAL Id: lirmm-04674991

<https://hal-lirmm.ccsd.cnrs.fr/lirmm-04674991v1>

Submitted on 22 Aug 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

VERS DE NOUVELLES MARQUES ÉLECTRONIQUES DE SUIVI D'ESPÈCES MARINES

Serge Bernard

Le projet BOSCO (*smart suBmarine integrated sensors system transmitting to Satellite for physiological and ethological study of fishes*) a été développé en 2015 au Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier (LIRMM) grâce au soutien de la Mission pour les Initiatives Transverses et Interdisciplinaires (MITI) du CNRS. Son objectif était d'imaginer et de développer un nouveau type de marque électronique permettant l'étude et la gestion durable des ressources halieutiques*. L'un des plus grandes originalités des marques développées

La gestion des ressources halieutiques est l'un des grands enjeux de la préservation de la biodiversité. Le marquage pour le suivi des animaux marins est un des outils efficaces pour cette gestion, mais pose des défis technologiques importants. La collaboration entre les chercheurs en électronique et en écologie marine est essentielle pour développer des marques. Ces marques doivent intégrer des capteurs mesurant des données mais sans perturber le comportement naturel des animaux. Ce travail interdisciplinaire a conduit à l'élaboration d'une marque satellite de nouvelle génération, permettant de reconstruire les trajectoires des espèces marines en les associant avec des données physiologiques.

réside dans leur capacité à effectuer des mesures nombreuses, variées et répétées permettant d'obtenir des informations continues sur la physiologie de l'animal lui-même, mais aussi sur sa localisation géographique et son environnement écologique. Ce projet est très fortement interdisciplinaire et ce à plusieurs niveaux. D'un point de vue applicatif, le développement de nouvelles marques de suivi d'animaux marins nécessite une très bonne connaissance des espèces cibles et des contraintes opérationnelles, impliquant forcément des spécialistes en écologie et biologie marine.

biodiversité
ressources halieutiques
océan
capteurs
microélectronique

L'objectif étant de mettre en place des méthodes de marquages viables et des marques ne perturbant pas le comportement naturel des espèces marquées. Au niveau du développement de la marque en tant que telle, il est indispensable de réunir des mécaniciens pour les problématiques de marinisation (poissons allant à plus de 1 000 mètres de profondeur, contrainte très forte pour avoir un volume minimal de la marque), des électroniciens/micro-électroniciens pour la partie électronique et capteurs, des spécialistes en matériaux pour la partie électrodes et des biologistes pour l'analyse de la signature électrobiologique obtenue à partir des données fournies par le capteur.

Contexte

Les écosystèmes marins subissent des pressions anthropiques de plus en plus importantes (demande alimentaire croissante en produits de la mer, pollutions, destructions des habitats), dans un contexte de changement climatique qui accroît potentiellement leur sensibilité à ces perturbations. La question de la

durabilité des écosystèmes marins n'a donc jamais été aussi prégnante, du fait de l'importance des services qu'ils rendent et des enjeux sociétaux du maintien de la biodiversité. Notre compréhension de ces écosystèmes, pour la plupart non explorés, est cependant limitée par la difficulté d'observer ces milieux extrêmes. Ceci est d'autant plus vrai pour les grands poissons pélagiques (thons rouges, germons, marlins, espadons, voiliers...) qui sont très mobiles et qui représentent une part importante des captures mondiales en valeur et en volume. Ainsi, de nombreuses questions scientifiques majeures émergent avec des implications fortes pour la gestion durable des stocks de ces espèces. Quelles sont les dynamiques migratoires des grands pélagiques comme le thon rouge? Quelles sont les zones de frayère* (où les poissons se reproduisent) et de nourricerie* (où les juvéniles grandissent) des espèces emblématiques? Quelle est la dynamique spatiale des tortues marines (en particulier les tortues vertes et tortues imbriquées) et comment utilisent-elles les habitats? Ces espèces sont particulièrement sensibles aux changements globaux et sont sur la liste rouge des espèces en danger de l'IUCN (Union Internationale pour la Conservation de la Nature).

L'objectif du projet est de proposer des systèmes électroniques, appelés « marques électroniques » qui seront accrochées sur les espèces marines ciblées et seront capables de collecter des informations sur les individus et leur environnement, puis de les transmettre via satellites. Pour que les solutions soient viables, il est indispensable qu'elles ne perturbent pas le comportement naturel de l'animal marqué et qu'elles puissent être déployées sur un grand nombre d'individus pour que les informations recueillies aient une robustesse statistique. Bien que des solutions commerciales existent à l'heure actuelle, elles sont extrêmement coûteuses (plus de 4 000 € par balise) et ne peuvent donc pas être déployées en grand nombre et fournissent des informations trop parcellaires. Mais surtout, aucune solution de marque n'est en mesure de donner des informations permettant de faire le lien entre les trajectoires et l'activité ou l'état des animaux.

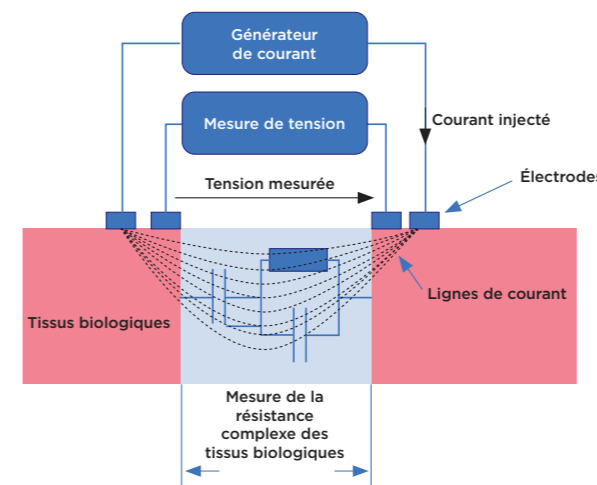


Figure 1. Principe de la mesure de bio-impédance.

Une marque satellite de nouvelle génération

L'étude des déplacements des mammifères marins est un sujet très avancé et requiert depuis longtemps l'utilisation de capteurs électroniques utilisant une géolocalisation satellitaire, comme le GPS ou l'ARGOS*. Dans le cas des poissons, qui – contrairement aux mammifères marins – ne remontent pas à la surface pour respirer, ce relevé de déplacement n'est pas réalisable. En effet, la géolocalisation satellitaire ne peut se faire qu'à la surface de l'eau, car les ondes sont sévèrement atténuées par l'eau, et encore plus par l'eau salée. Aujourd'hui les solutions mises en œuvre pour suivre le déplacement des poissons s'appuient sur des marques électroniques qui embarquent des capteurs de lumière et d'autres capteurs environnementaux (pression, par exemple) qui permettent d'estimer l'heure du lever et du coucher du soleil et l'heure du midi afin d'en déduire la longitude et la latitude. Cette méthode à une précision de l'ordre du degré, ce qui revient à une erreur d'environ 100 km. Cette incertitude est bien plus importante que celle obtenue par GPS, qui est de l'ordre du mètre. Cette précision pourrait être améliorée grâce à la fusion de capteurs et de données externes, en couplant des mesures environnementales sur la marque avec des relevés satellitaires existants (salinité, température, champ magnétique...).

Par ailleurs, aucun capteur électronique existant ne permet de mesurer des paramètres physiologiques sur les grands pélagiques. Dans le projet BOSCO, les capteurs implantés sur les poissons pourraient mesurer la température corporelle interne, la fréquence cardiaque, le taux de gras, le pH. Ces informations devraient permettre d'acquérir des connaissances sur la biologie (reproduction, alimentation, etc.) des espèces marines étudiées. Les principales problématiques sont liées à la conception de systèmes microélectroniques pour le recueil de signaux électriques physiologiques adaptés au modèle biologique. Cette mesure physiologique embarquée est l'élément clé du projet, permettant d'amener une rupture scientifique dans le domaine du suivi des grands pélagiques et elle générerait des données uniques et indispensables à la bonne compré-

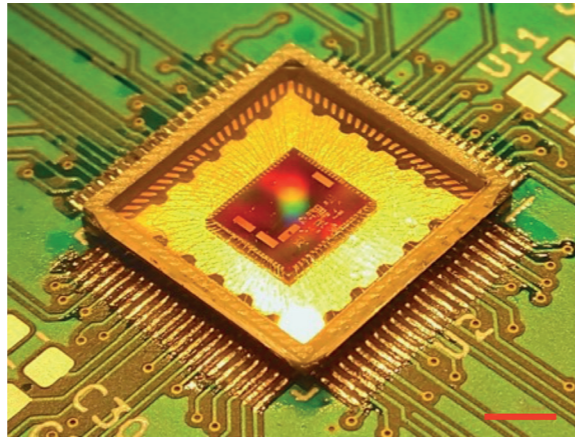


Figure 2. Puce microélectronique de spectroscopie de bio-impédance.

hension des espèces en associant clairement la géolocalisation et l'activité des animaux étudiés.

Les données récoltées doivent ensuite être acheminées pour être traitées en laboratoire. En ce qui concerne ce transfert des données, plusieurs possibilités sont envisageables. En premier lieu, le capteur peut « terminer » entre les mains d'un pêcheur, qui le restitue à l'Ifremer ou au CNRS grâce aux indications inscrites sur le boîtier, mais les taux de retour sont en général assez faibles au regard des expériences passées. Afin d'augmenter le taux de retour, le projet BOSCO s'est focalisé sur les marques satellite qui enregistrent les informations environnementales nécessaires à la géolocalisation (et les informations physiologiques associées) pendant un temps prédéfini. Quand cette période de fonctionnement est atteinte, un système de décrochage mécanique permet de libérer la marque qui remonte alors à la surface et transmet ses données directement via des constellations de satellites (Argos, Iridium).

Enfin, un paramètre important pour la viabilité du projet réside dans l'autonomie du système de capteurs. En effet, pour obtenir des informations exploitables sur la physiologie et le comportement du poisson, le capteur doit réaliser des mesures pendant une période de plusieurs mois, voire de plus d'un an. Il ne faut pas perdre

de vue que le capteur est « porté » par l'animal, ce qui induit des limitations fortes de taille et de poids interdisant des batteries surdimensionnées. Il est indispen-

sable de ne pas perturber le comportement de l'animal suivi, car c'est justement le comportement naturel que les scientifiques cherchent à étudier. Tous les éléments

électroniques et leur activation ont donc été optimisés, mais malgré ces stratégies de basse consommation, il est nécessaire de trouver des solutions d'auto-alimentation, comme la récupération d'énergie thermique ou mécanique par captation de mouvements ou de vibrations.

Six ans après

L'objectif annoncé dans le projet BOSCO était très ambitieux, amenant une réelle rupture technologique qui permettrait à la communauté scientifique d'avoir accès à de nouveaux outils de suivi d'espèce. Cette rupture ne pouvait pas être atteinte avec le niveau du financement du projet, mais le projet BOSCO et le soutien du CNRS du programme « instrumentation aux limites » a été un catalyseur et a permis le montage de projets plus importants, avec cet objectif global de nouvelle marque satellite alliant la physiologie et la géolocalisation. Le premier projet d'envergure issu des travaux du projet BOSCO a été le projet étendard POPSTAR financé par l'Ifremer pour poursuivre le développement de ces nouvelles marques satellites. Par la suite, le projet FishNchip

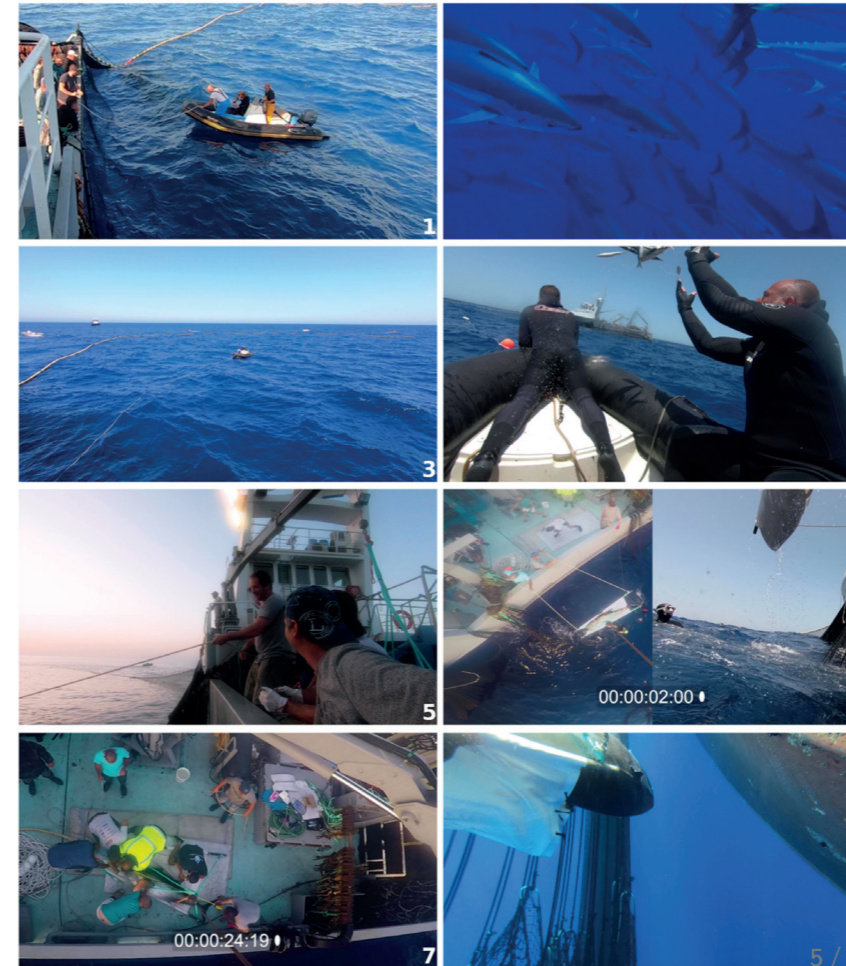


Figure 3. Marquage de thon rouge à partir d'un senneur (navire de pêche qui capture les poissons en surface en les encerclant avec un filet de pêche) 1. La ligne de pêche est embarquée sur un zodiac à l'intérieur de la senne. 2. Intérieur de la senne avec les thons rouges capturés. 3. Le zodiac amène la ligne loin du senneur pour augmenter les chances de (re)prise des thons par la ligne de pêche. 4. Les poissons sont appâtés avec des sardines pour faciliter la prise par la ligne de pêche. 5. Le poisson qui a mordu à la ligne est ramené, tiré à la main, proche du senneur. 6. Le poisson est placé dans une civière manœuvrée par plusieurs plongeurs et remorqué sur le pont du bateau. 7. L'opération de mise en place de la marque sur le thon. 8. La remise à l'eau, en dehors de la senne, du thon marqué.

(financé par l'Europe), toujours en collaboration très étroite avec l'Ifremer, a vu le jour et a permis de travailler sur les capteurs physiologiques imaginés dans le cadre du projet BOSCO. L'objectif du projet FishNchip est de développer des capteurs intégrables pour la compréhension des aires de reproduction du thon rouge. Afin de recueillir des informations sur l'état et l'activité de l'animal, le capteur renvoie une mesure de spectroscopie de bio-impédance*. Le dispositif embarqué stimule donc les tissus du poisson avec un courant très faible et mesure la tension de réponse (figure 1). Ce type de mesure, à l'échelle de la cellule, permet d'extraire des informations locales sur la composition des tissus, mais aussi sur l'état global de l'animal. Par exemple, il est possible d'évaluer l'évolution du taux de gras des tissus, qui est un indicateur des phases de reproduction ou de changement alimentaire.

Dans ce contexte, plusieurs verrous importants doivent encore être levés. La mesure devra être ultrarapide pour ne pas être perturbée par l'activité permanente de l'animal. De plus, elle devra être auto-adaptative pour compenser ou configurer les mesures en fonction d'un environnement qui évoluera sur la durée du marquage (plusieurs mois). Le dispositif devra également fonctionner avec une faible consommation d'énergie et en multifréquence, afin de pouvoir extraire le maximum de paramètres bioélectriques de l'animal. Enfin, les électrodes implantées ne devront pas perturber l'animal.

Plusieurs circuits microélectroniques ont déjà été réalisés. La figure 2 présente la dernière version de la puce en silicium, qui fait 3 millimètres par 4 avec une finesse de gravure de 180 nanomètres (10⁻⁹ mètres) et permet de faire une mesure sur plus de 20 fréquences en 300 microsecondes. L'originalité réside dans son architecture optimisée pour chaque bande de fré-

quence, permettant d'améliorer les performances tout en accélérant la vitesse de mesure.

En parallèle de ces développements technologiques, de nouvelles techniques de marquage de grands pélagiques (figure 3) ont aussi été développées, afin de pouvoir, à terme, déployer nos marques.

Bibliographie

- F. SOULIER, A. LAMLIH, V. KERZÉRHO, S. BERNARD et T. ROUYER - *Very Low Resource Digital Implementation of Bioimpedance Analysis*, Sensors, 19(15), 3381. <https://doi.org/10.3390/s19153381>, 2019.
- A. LAMLIH, V. KERZÉRHO, S. BERNARD, F. SOULIER, M. COMTE, M. RENOVELL, T. ROUYER et S. BONHOMMEAU - *Mixed-level simulation tool for design optimization of electrical impedance spectroscopy systems*, Impedance Spectroscopy Advanced Applications, Olfa Kanoun, 71-80. Walter de Gruyter, 2018.
- T. ROUYER, S. BONHOMMEAU, N. GIORDANO, F. GIORDANO, S. ELLUL, G. ELLUL, S. DEGUARA, B. WENDLING, S. BERNARD et V. KERZERHO, *Tagging Atlantic Bluefin Tuna from a Mediterranean Spawning Ground Using a Purse Seiner*, Fisheries Research 226, 2020.
- embed.ifremer.fr/videos/9/5/9501f92cc8104ec790ff2affc8d7ec1e/f810f9088b804ca4824133ef38d56dcb.mp4
- lejournal.cnrs.fr/articles/dans-le-sillage-des-thons-rouges
- fr.wikipedia.org/wiki/Bio-impédance
- www.sciencesetavenir.fr/animaux/premiere-mondiale-des-thons-suivis-par-balise_146975

ARGOS. Système mondial de localisation et de collecte de données géo-positionnées par satellite.

Frayère. Lieu où les poissons déposent leurs œufs.

Nourricerie. Lieu où les jeunes animaux (les juvéniles) grandissent.

Ressources halieutiques. Ressources vivantes des milieux aquatiques marins exploitées par l'Homme.

Spectroscopie de bio-impédance. Mesure de la résistance électrique complexe sur plusieurs fréquences.

