



**HAL**  
open science

# Le son dans les récifs coralliens : de la production par les organismes à la compréhension par l'écologue

Simon Elise

## ► To cite this version:

Simon Elise. Le son dans les récifs coralliens : de la production par les organismes à la compréhension par l'écologue. Travaux & documents, 2016, Perception, représentation, compréhension, 50, pp.25-34. hal-02163145

**HAL Id: hal-02163145**

**<https://hal.univ-reunion.fr/hal-02163145>**

Submitted on 24 Jun 2019

**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.

# Le son dans les récifs coralliens : de la production par les organismes à la compréhension par l'écologie

---

SIMON ELISE<sup>1</sup>

## RÉSUMÉ

La perception, la représentation et la compréhension constituent trois étapes clés de la démarche de l'écologie. Les nouveaux modes de perception offerts par les innovations technologiques récentes ouvrent la voie à d'autres formes de représentation, et donc de compréhension, de la complexité des écosystèmes. Dans les récifs coralliens, toucher et vue ont longtemps été employés pour prélever des échantillons. Ces méthodes, jusqu'alors satisfaisantes, présentent néanmoins des limites d'utilisation importantes. Depuis quelques années, l'éco-acoustique propose un nouveau mode de perception, basé sur l'enregistrement du « paysage sonore » de l'écosystème. Moins dépendante de l'observateur, moins coûteuse à mettre en œuvre et permettant d'échantillonner rapidement de grands espaces, l'éco-acoustique pourrait se révéler comme un outil de premier choix dans la gestion durable des ressources récifales. À l'heure où les récifs coralliens sont extrêmement menacés par les pressions anthropiques, la mise au point d'outils opérationnels d'évaluation et de suivi de l'état de ces écosystèmes a pris un caractère urgent. Cet article donne un aperçu de l'avancée des recherches dans l'application de l'éco-acoustique à l'étude des écosystèmes coralliens.

## INTRODUCTION

Le terme « écologie » a aujourd'hui une forte résonance socio-politique mais il désigne avant tout une discipline scientifique, définie pour la première fois en 1866 par Ernst Haeckel. L'écologie vise à comprendre les relations des êtres vivants avec leur habitat et leur environnement, ainsi qu'avec les autres êtres vivants (Haeckel, 1866). Afin de comprendre ces relations, il faut pouvoir les évaluer et donc en « capturer » une représentation, un échantillon. Cette représentation doit être la plus fidèle possible à l'objet d'étude tout en demandant un effort de mise en œuvre raisonnable ; c'est tout l'enjeu du choix d'une méthode d'échantillonnage adaptée. L'échantillon, représentatif d'une composante de l'écosystème à un moment donné, est le fruit de la perception d'une certaine réalité par l'écologie, perception qui fait directement appel à ses sens.

---

<sup>1</sup> NORTEKMED - UMR 9220 ENTROPIE, [simon.elise@nortekmed.com](mailto:simon.elise@nortekmed.com).

Historiquement, l'Homme semble avoir eu besoin de toucher pour comprendre. La collecte de spécimens a été systématisée par les grands naturalistes du XVIII<sup>e</sup> siècle, précurseurs de l'écologie. Cette approche, laborieuse et destructrice, a néanmoins permis de décrire une bonne partie des organismes vivants connus à ce jour. Si elle apporte des informations qualitatives détaillées, elle ne renseigne pas sur les aspects quantitatifs inhérents à l'écologie, tels que la taille des populations ou les proportions de telle ou telle espèce dans l'écosystème.

Des méthodes visuelles ont alors été développées pour apporter des informations quantitatives. Afin de pouvoir comparer les échantillons relevés d'une localité à une autre et au fil du temps, les écologues ont standardisé les approches visuelles. La population d'une espèce donnée, ou l'assemblage de diverses espèces, est alors observée sur une unité de surface déterminée durant une durée déterminée. Ces méthodes apportent des informations importantes en termes qualitatifs et quantitatifs mais ont montré également leurs limites. Tout d'abord, les évaluations réalisées reflètent la réalité de l'écosystème au moment de l'échantillonnage, sur une durée de quelques minutes à quelques heures, mais elles demandent un gros effort humain pour refléter des périodes de temps plus longues telles que des mois ou des années. Ensuite, elles se limitent à la fraction visible des peuplements et sont soumises aux biais dus à la présence de spécialistes sur le terrain. Enfin, le déploiement de tels spécialistes est inadapté à certains contextes, coûteux, voire inabordable pour de nombreux pays aux ressources financières limitées.

Les avancées technologiques des dernières décennies ont permis de donner un nouveau souffle aux méthodes d'évaluation des écosystèmes, en faisant appel dans certains cas à de nouvelles perceptions sensorielles qui permettent d'explorer d'autres facettes des écosystèmes.

## **L'ÉCO-ACOUSTIQUE : UN NOUVEL OUTIL DE SUIVI ET D'ÉVALUATION**

L'essor récent des technologies d'enregistrement des sons a rendu possible leur utilisation simultanée sur des sites multiples et sur du long-terme (Villanueva-Rivera *et al.*, 2011 ; Sueur *et al.*, 2014), donnant naissance à une approche nouvelle pour étudier les processus écologiques : l'éco-acoustique (Sueur & Farina, 2015). L'éco-acoustique se base sur l'utilisation de l'acoustique passive, qui met en œuvre des techniques d'écoute élaborées pour détecter et suivre l'activité des individus sans interférer avec leur comportement (Sueur & Farina, 2015).

Sueur et Farina indiquent que dans cette discipline, le son est considéré à la fois comme un composant et un indicateur des processus écologiques. L'éco-acoustique peut ainsi jouer un rôle central dans l'évaluation de la biodiversité en détectant potentiellement l'occurrence d'espèces d'intérêt, et en estimant les changements de diversité acoustique des paysages sonores dans le temps et dans

l'espace. L'éco-acoustique offre en outre l'opportunité d'estimer les changements de qualité de l'habitat, et d'évaluer l'importance des bruits générés par les activités anthropiques dans le façonnage de la diversité acoustique des paysages sonores (Sueur & Farina, 2015).

Cette dernière facette s'inscrit dans le domaine de l'écologie des paysages sonores, qui fait partie intégrante de l'éco-acoustique. Les paysages sonores sont définis par Pijanowski *et al.* comme « l'arrangement complexe de sons d'origines multiples qui crée des motifs dans l'espace et dans le temps »<sup>1</sup>. Ces sons appartiennent à 3 grandes classes (Pijanowski *et al.*, 2011a, 2011b) :

- la biophonie est l'ensemble des sons produits par les différents organismes vivants
- la géophonie représente les sons de l'environnement géophysique (vent, eau, etc.)
- l'anthrophonie est générée par les activités humaines.

Les dynamiques spatiales et temporelles des paysages sonores résultent d'interactions complexes entre les organismes vivants, leur environnement naturel et les activités anthropiques. L'étude de la biophonie, au cœur de l'évaluation de la biodiversité, est en ce sens indissociable de l'étude des géophonies et anthrophonies associées (Pijanowski *et al.*, 2011b).

L'éco-acoustique propose ainsi une approche nouvelle et fondamentalement écosystémique, qui permet d'évaluer globalement la biodiversité, dans sa fraction visible mais aussi invisible. Appliquée très récemment sur les récifs coralliens (Lammers *et al.*, 2008), elle a rapidement été identifiée comme un outil très prometteur pour l'évaluation et le suivi de l'état de ces écosystèmes (Lammers *et al.*, 2008 ; Kennedy *et al.*, 2010).

## LA PRODUCTION DE SONS ET LEUR PERCEPTION DANS LES ÉCOSYSTÈMES CORALLIENS

Les récifs coralliens ont une signature acoustique caractéristique, plus sonore et plus riche que la signature océanique (Kennedy *et al.*, 2010). Ils représentent un environnement acoustique très hétérogène dans lequel une multitude d'organismes produisent des signatures spectrales uniques (Freeman *et al.* 2014a). Ces sons d'origine biologique dominent les paysages sonores récifaux en occupant un large spectre de fréquences (Freeman *et al.*, 2014a, 2014b). Les études bioacoustiques ont largement contribué à caractériser les sons émis par certains organismes récifaux, tels que les crevettes pistolets ou les poissons. Les apports de l'éco-acoustique ont permis de compléter ces résultats.

---

<sup>1</sup> B.C. Pijanowski, A. Farina, S.H. Gage, S.L. Dumyahn, B.L. Krause, "What is soundscape ecology? An introduction and overview of an emerging new science", *Landscape Ecology*, 26, New York, Springer Publishing, 2011a, p. 1213-1232.

Le « crépitement » engendré par l'activité des « crevettes pistolet » (*Alpheus sp.*) est le son ambiant qui domine les eaux tropicales peu profondes autour du monde (Cato & Bell, 1992). Ce crépitement est issu de l'addition de clics générés par de nombreux individus de crevettes qui ferment très rapidement leur pince en créant un déplacement d'eau rapide : ce mécanisme produit une bulle de cavitation dont l'effondrement est à l'origine d'un « clic » (Versluis *et al.*, 2000).

L'influence de l'activité d'autres organismes macro-benthiques sur les paysages sonores récifaux a également été mise en évidence (Freeman *et al.*, 2014b). Le terme « macro-organismes benthiques » désigne les crustacés, mollusques, ou encore échinodermes visibles à l'œil nu et ayant la capacité de se déplacer sur le substrat récifal. Freeman *et al.* (2014b) ont montré que les frottements des coquilles et exosquelettes de bernard-l'ermite sur un substrat de corail mort produisaient des sons dans la bande de fréquence 11-17 kHz. Ces auteurs considèrent que les structures externes des crustacés et gastéropodes interagissent de façon passive avec le substrat au cours des déplacements de l'organisme, générant la majeure partie des sons enregistrés dans la bande de fréquence 11-17 kHz. Ils observent également que l'activité sonore dans cette bande de fréquence se poursuit le jour à moindre intensité et interprètent cette observation comme la preuve que l'activité des macro-organismes benthiques continue le jour dans les anfractuosités du récif.

Par ailleurs, dans les récifs coralliens passés sous dominance algale, les algues fixées sur le substrat réduisent probablement le contact entre les structures rigides de ces organismes et les roches ou coraux du substrat. Les signaux acoustiques produits par ce contact doivent ainsi être d'autant plus réduits qu'il y a d'algues fixées : les caractéristiques des sons produits par les macro-organismes benthiques pourraient ainsi servir d'indicateur par procuration de l'état écologique des récifs coralliens (Freeman *et al.*, 2014b).

Certaines espèces de poissons de récifs émettent également des sons, mais cet aspect de leur comportement a été largement sous-étudié jusqu'alors (Lobel *et al.*, 2010). Lobel et ses collaborateurs ont passé en revue la littérature à ce sujet et ont recensé 273 espèces pour lesquelles une activité acoustique a été identifiée. L'étude de Tricas & Boyle (2014) a complété cette liste, en identifiant les sons émis par 45 espèces sur un récif hawaïen. Les sons émis par les poissons de récif peuvent résulter de quatre facteurs : 1- d'interactions compétitives pour la nourriture ou pour l'espace ; 2- de comportements de parade de séduction, de ponte ou de défense des nids ; 3- de comportements alimentaires ; 4- de déplacements en larges bancs (Lobel *et al.*, 2010 ; Tricas & Boyle 2014). Ces signaux acoustiques peuvent prendre des formes très diverses, en termes de durée, de type de signal et de fréquence d'émission (Lobel *et al.*, 2010 ; Tricas & Boyle, 2014). La majorité de ces signaux se concentre dans les basses fréquences (Hildebrand, 2009 ; Tricas & Boyle, 2014) même si les comportements alimentaires de certaines familles tels que les poissons perroquets ou les poissons

balistes produisent des sons sur une large bande spectrale dans les moyennes fréquences (2-6 kHz ; Tricas & Boyle, 2014). Les poissons produisent des sons de façon individuelle, mais également en « chœurs » (Cato & McCauley, 2002). De plus, la plupart des espèces étudiées produisent des sons en suivant des cycles nycthémeraux, lunaires ou saisonniers (Cato & McCauley, 2002).

À cette riche biophonie récifale s'ajoutent des sons créés par des processus physiques. On peut penser à la géophonie avec les vagues, le vent, la pluie... On trouve aussi des sons générés par les activités humaines. C'est le cas de l'anthrophonie : bruits de moteurs, plongeurs, exploration sismique... On peut se référer pour cet aspect aux travaux d'Hildebrand (2009).

L'oreille humaine nous permet de percevoir les fréquences comprises entre 20 et 20 000 Hertz mais il nous est impossible de représenter et d'analyser en temps réel le spectre perçu. Des outils sophistiqués doivent donc être utilisés afin de percevoir et d'enregistrer les paysages sonores. En milieu marin, des hydrophones reliés à des dispositifs d'enregistrement sont utilisés à ces fins.

Un hydrophone est généralement constitué d'un réseau de céramiques qui reçoivent les ondes acoustiques et les transforment en signaux électriques (piezo-électricité). Ces signaux sont alors amplifiés puis transmis à une carte d'acquisition qui, reliée à un ordinateur, transforme les signaux en fichiers de son de type « .wav ». Selon la capacité du disque dur, des jours voire des mois de sons peuvent ainsi être stockés.

## LA REPRÉSENTATION DES PAYSAGES SONORES

Les paysages sonores enregistrés en format « .wav » peuvent être traités et analysés grâce à différents outils informatiques, présentés par exemple dans les études de Villanueva-Rivera *et al.* (2011), Pijanowski *et al.* (2011a, 2011b) ou Sueur & Farina (2015).

L'étape de base du traitement du signal consiste à convertir les fichiers .wav en niveaux d'amplitude par fréquence, en utilisant des transformations de Fourier (Hartmann, 1997 ; Villanueva-Rivera *et al.*, 2011 ; Sueur & Farina, 2015). Ces données sont ensuite projetées sur des graphiques à trois axes appelés « spectrogrammes ». Sur un spectrogramme l'axe « x » représente le temps, l'axe « y » les fréquences et l'axe « z » l'intensité. Cette dernière est habituellement représentée par une échelle de couleur (Villanueva-Rivera *et al.*, 2011 ; Pijanowski *et al.*, 2011a ; Pijanowski *et al.*, 2011b). Le spectrogramme permet au chercheur d'avoir une vision globale de l'intensité des différents sons présents dans un échantillon, la lecture d'un spectrogramme est ainsi comparée à celle d'une partition de musique par Pijanowski *et al.* (2011a) et Staaterman *et al.* (2014). Des graphiques fréquence-amplitude sont également utilisés pour visualiser les fichiers de sons (Villanueva-Rivera *et al.*, 2011).

Selon les questionnements auxquels souhaite répondre l'écologue, il construira autant de spectrogrammes qu'il y a de sites et/ou de périodes

d'échantillonnage dans son étude. Chaque spectrogramme constituera alors un échantillon représentatif de l'écosystème sur un site donné à un moment donné.

### **L'ANALYSE DES SPECTROGRAMMES, CLÉ DE LA COMPRÉHENSION DES PAYSAGES SONORES RÉCIFAUX**

La compréhension des paysages sonores enregistrés sur les récifs nécessite de confronter les spectrogrammes à des observations visuelles réalisées sur les mêmes localités. Cette démarche doit conduire l'écologue à trouver des relations entre variables issues des échantillonnages acoustiques et variables issues des échantillonnages visuels. Le but est de pouvoir à terme se baser sur les seuls enregistrements acoustiques pour évaluer l'état des principaux peuplements qui constituent ces écosystèmes.

Il existe de nombreuses voies pour analyser un spectrogramme (Pijanowski *et al.*, 2011b). Une des approches utilisées actuellement consiste à décomposer le spectre en bandes de fréquences puis à mesurer l'intensité des sons qui dépassent un certain seuil sur chaque bande.

Cette approche permet de calculer de nombreuses variables :

- amplitude sonore de l'échantillon toutes fréquences confondues
- amplitude sonore sur de larges bandes de fréquences
- amplitude sonore sur des bandes de fréquences précises (bandes d'octaves, 1/3 d'octaves)
- amplitude sonore attribuable aux vocalisations de poissons sur des bandes d'octave définies
- nombre de « clics » de crevettes pistolet par minute.

Les variables calculées peuvent également être des indices, calculés sur tout ou partie du spectre :

- indice de complexité acoustique (ACI),
- indice d'entropie acoustique (H)

Les moyennes et déviations standards de ces variables sont ensuite calculées pour chaque :

- site
- période de la journée (aube, jour, crépuscule, nuit)
- période lunaire (nouvelle lune, pleine lune)
- saison (saison humide, saison sèche).

Différents types d'analyses peuvent être conduits pour explorer les relations entre variables acoustiques et variables biologiques ou environnementales. Ainsi les mesures de biodiversité *in situ* doivent être comparées aux mesures des paysages sonores pour déterminer combien les organismes émetteurs de sons informent, par procuration, sur la biodiversité générale (Pijanowski *et al.*, 2011a).

En suivant cette démarche, Kennedy *et al.* (2010) et Nedelec *et al.* (2015) montrent des corrélations significatives entre la densité de poissons et l'intensité

des sons sur des bandes de basses fréquences. Piercy et son équipe. (2014) indiquent que les récifs ayant les plus fortes densités en poissons sont également ceux qui sont les plus sonores, et en particulier dans les basses fréquences. Pour Radford et ses collaborateurs (2014), les signatures acoustiques différentes enregistrées dans trois habitats récifaux résultent probablement de différences dans l'abondance de poissons acoustiquement actifs, tels que les demoiselles ; ils indiquent que les spectres enregistrés sur ces habitats varient principalement dans les basses fréquences (Radford *et al.*, 2014). Des liens similaires sont évoqués par Kaplan *et al.* (2015).

Kennedy *et al.* (2010) montrent également une corrélation significative entre les densités totales de poissons observées et l'intensité du son dans les hautes fréquences. En se basant sur les connaissances acquises par la bioacoustique, Kennedy *et al.* (2010) expliquent que cette corrélation est certainement indirecte dans le sens où ces fréquences sont plus hautes que celles généralement attribuées à l'activité des poissons. Ils suggèrent que les poissons sélectionneraient préférentiellement les récifs acoustiquement riches en hautes fréquences, ces dernières correspondant à l'activité d'invertébrés et pouvant témoigner d'un meilleur état de santé du récif (Kennedy *et al.*, 2010).

En revanche, les corrélations entre variables acoustiques et diversité en poissons sont faiblement significatives dans l'étude de Kennedy *et al.* (2010).

Freeman et ses collègues (2014b) réalisent des photographies nocturnes à intervalles de temps réguliers afin de suivre l'activité des organismes macrobenthiques. Ils mettent en évidence une corrélation positive entre l'augmentation de leur activité et l'intensité du son dans les hautes fréquences sur différents récifs des îles de la Ligne (Freeman *et al.* 2014b). Ils observent ainsi un pic d'activité commun à tous les récifs, de jour comme de nuit, autour de 14.5 kHz et indiquent que les crustacés, gastéropodes et ophiuroïdes sont les groupes les plus abondants la nuit (Freeman *et al.*, 2014b).

Bien qu'aucune étude n'ait à ce jour mis en évidence de production de sons par les coraux, algues ou autres composants benthiques sessiles, la diversité corallienne et benthique est un facteur important dans la prédiction de l'intensité du son émis par les récifs dans les basses et moyennes fréquences (Kennedy *et al.*, 2010).

L'équipe de Kennedy (2010) indique que la diversité en corail vivant crée une complexité spatiale sur le récif, augmentant la disponibilité en habitat pour les invertébrés benthiques qui, eux, émettent des sons dans les moyennes fréquences. La diversité corallienne et benthique pourrait en ce sens influencer indirectement sur l'intensité du son émis par les invertébrés dans les moyennes fréquences. À leur tour, les récifs avec une intensité sonore importante dans les moyennes fréquences pourraient supporter un peuplement de poissons plus abondant et plus divers (Kennedy *et al.*, 2010). Les résultats de Piercy *et al.* (2014) et Bertucci *et al.* (2015) vont dans le sens des résultats de Kennedy *et al.* (2010) : ils indiquent que les habitats récifaux avec une couverture corallienne



importante favorisent la biodiversité et sont plus sonores et plus riches en événements acoustiques (Piercy *et al.*, 2014 ; Bertucci *et al.*, 2015). Kaplan *et al.* (2015) trouvent également des liens entre couverture corallienne et intensité sonore dans les basses fréquences. Piercy *et al.* (2014) montrent que les récifs dominés par les macro-algues présentent des intensités de sons faibles dans toutes les fréquences.

Dans leur étude, par la lecture des spectrogrammes, Harris *et al.* (2015) ont identifié visuellement les échantillons contenant des sons de bateau ou d'autres sources anthropiques. En outre, des outils avancés de « *machine learning* » ont également été mis au point (Pijanowski *et al.*, 2011b). Ces outils scannent automatiquement les enregistrements à la recherche de motifs préalablement « enseignés » au programme par l'utilisateur (Pijanowski *et al.*, 2011b ; Potamitis, 2014). Ces approches peuvent permettre de reconnaître la présence de sons d'origine anthropique ou géophysique, mais aussi la présence ou absence d'une espèce ou d'un groupe d'espèces à la fois dans l'espace et dans le temps (Aide *et al.*, 2013 ; Sueur & Farina, 2015).

## CONCLUSION

Les recherches en cours dans le domaine de l'éco-acoustique doivent nous conduire à mettre en évidence des indicateurs permettant d'évaluer et suivre l'état des récifs coralliens. L'avènement de nouveaux modes de perception, tels que l'éco-acoustique dans les récifs coralliens, nous permet d'envisager l'étude des écosystèmes sous de nouvelles facettes et à des échelles temporelles et spatiales bien plus importantes.

L'interprétation des signaux acoustiques, encore très liée aux observations visuelles, s'en détachera probablement, et donnera certainement lieu à la découverte de nouveaux aspects de la biodiversité et de la fonctionnalité des écosystèmes.

Nous commençons à peine aujourd'hui à comprendre la complexité des écosystèmes coralliens. La prise en compte de perceptions multiples nous permettra de franchir des pas importants dans cette compréhension. Sans renier les apports des précédents modes de perception tels que le toucher ou la vue, les nouveaux outils comme l'acoustique doivent y apporter un complément important. Il y a fort à parier que les processus chimiques, faisant référence à l'odorat et au goût, seront également fortement développés dans les années à venir. L'écologue bénéficiera alors d'un panel d'outils de perception diversifiés, échantillons complémentaires d'une même réalité écosystémique.

**BIBLIOGRAPHIE**

- Aide, T.M., Corrada-Bravo, C., Campos-Cerqueira, M., Milan, C., Vega, G., Alvarez, R., "Real-time bioacoustics monitoring and automated species identification", *PeerJ*, 1, e103, États-Unis, PeerJ, 2013.
- Bertucci, F., Parmentier, E., Berten, L., Brooker, R.M., Lecchini, D., "Temporal and spatial comparisons of underwater sound signatures of different reef habitats in Moorea Island, French Polynesia", *PLoS ONE*, États-Unis, Public Library of Science, 10, 2015, p. 1-12.
- Cato, D.H., Bell, M.J., "Ultrasonic ambient noise in Australian shallow waters at frequencies up to 200 kHz (No. MRL-TR-91-23)", *Materials Research Labs Ascot Vale*, Australia, 1992.
- Cato, D.H., McCauley, R.D., "Australian research in ambient sea noise", *Acoustics Australia*, Australia, 30, 2002, p. 13-20.
- Freeman, S.E., Buckingham, M.J., Freeman, L.A., Lammers, M.O., D'Spain, G.L., "Cross-correlation, triangulation, and curved-wavefront focusing of coral reef sound using a bi-linear hydrophone array", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 137, New York, AIP Publishing, 2014a, p. 30-41.
- Freeman, S.E., Rohwer, F.L., D'Spain, G.L., Friedlander, A.M., Gregg, A.K., Sandin, S.A., Buckingham, M.J., "The origins of ambient biological sound from coral reef ecosystems in the Line Islands archipelago", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 135, New York, AIP Publishing, 2014b, p. 1775-1788.
- Haeckel, E.H., *Generelle Morphologie der Organismen allgemeine Grundzüge der organischen Formen-Wissenschaft, mechanisch begründet durch die von Charles Darwin reformirte Descendenz-Theorie von Ernst Haeckel: Allgemeine Entwicklungsgeschichte der Organismen kritische Grundzüge der mechanischen Wissenschaft von den entstehenden Formen der Organismen, begründet durch die Descendenz-Theorie*, vol. 2, Berlin, Verlag von Georg Reimer, 1866.
- Harris, S.A., Shears, N.T., Radford, C.A., "Ecoacoustic indices as proxies for biodiversity on temperate reefs", *Methods in Ecology and Evolution*, London, British Ecological Society, 2015.
- Hartmann, W.M., "AIP series in modern acoustics and signal processing", *Signals, sound and sensation*, New York, Springer, 1997.
- Hildebrand, J.A., "Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean", Denmark, *Marine Ecology Progress Series*, 395, Lüneburg, Interresearch Print, 2009, p. 5-20.
- Kaplan, M.B., Mooney, T.A., Partan, J., Solow, A.R., "Coral reef species assemblages are associated with ambient soundscapes", *Marine Ecology Progress Series*, 533, Lüneburg, Interresearch Print, 2015, p. 93-107.
- Kennedy, E.V., Holderied, M.W., Mair, J.M., Guzman, H.M., Simpson, S.D., "Spatial patterns in reef-generated noise relate to habitats and communities: Evidence from a Panamanian case study", *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 395, Amsterdam, Elsevier, 2010, p. 85-92.
- Lammers, M.O., Brainard, R.E., Au WWL, Mooney, T.A., Wong, K.B., "An ecological acoustic recorder (EAR) for long-term monitoring of biological and anthropogenic sounds on coral reefs and other marine habitats", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123, New York, AIP Publishing, 2008, p. 1720-1728.

- Lobel, P.S., Kaatz, I.M., Rice, A.N., “Acoustical behavior of coral reef fishes”. *Reproduction and sexuality in marine fishes: patterns and processes*, California, University of California Press Books, 2010, p. 307-333.
- Munger, L.M., Fisher-Pool, P., McCoy, K., Lammers, M.O., Tricas, T., Au WWL, Wong, K., Brainard, R.E., “Long-term passive acoustic monitoring of parrotfishes (*Scaridae*) in the Hawaiian Archipelago”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, New York, AIP Publishing, 130(4), 2011, p. 2322-2322.
- Piercy, J.J.B., Codling, E.A., Hill, A.J., Smith, D.J., Simpson, S.D., “Habitat quality affects sound production and likely distance of detection on coral reefs”, *Marine Ecology Progress Series*, 516, Lüneburg, Interresearch Print, 2014, p. 35-47.
- Pijanowski, B.C., Farina, A., Gage, S.H., Dumyahn, S.L., Krause, B.L., “What is soundscape ecology? An introduction and overview of an emerging new science”, *Landscape Ecology*, 26, New York, Springer Publishing, 2011a, p. 1213-1232.
- Pijanowski, B.C., Villanueva-Rivera, L.J., Dumyahn, S.L., Farina, A., Krause, B.L., Napoletano BM, Gage SH, Pieretti N, “Soundscape Ecology: The Science of Sound in the Landscape”, *BioScience*, Oxford, Oxford University Press, 61, 2011b, p. 203-216.
- Potamitis, I., “Automatic classification of a taxon-rich community recorded in the wild”, *PLoS ONE*, États-Unis, Public Library of Science, 9, 2014, p. 1-11.
- Radford, C.A., Stanley, J.A., Jeffs, A.G., “Adjacent coral reef habitats produce different underwater sound signatures”, *Marine Ecology Progress Series*, 505, Lüneburg, Interresearch Print, 2014, p. 19-28.
- Staaterman, E., Paris CB, DeFerrari HA, Mann DA, Rice AN, D’Alessandro EK, “Celestial patterns in marine soundscapes”, *Marine Ecology Progress Series*, Lüneburg, 508, Interresearch Print, 2014, p. 17-32.
- Sueur, J., Farina, A., Gasc, A., Pieretti, N., Pavoine, S., “Acoustic indices for biodiversity assessment and landscape investigation”, *Acta Acustica united with Acustica*, 100, European Acoustics Association (EAA), 2014, p. 772-781.
- Sueur, J., Farina, A., “Ecoacoustics: the Ecological Investigation and Interpretation of Environmental Sound”, *Biosemiotics*, Stuttgart, S. Hirzel Verlag, 8, 2015, p. 493-502.
- Tricas, T.C., Boyle, K.S., “Acoustic behaviors in Hawaiian coral reef fish communities”, *Marine Ecology Progress Series*, Lüneburg, Interresearch Print, 511, 2014, p. 1-16.
- Versluis, M., Schmitz, B., von der Heydt, A., Lohse, D., “How Snapping Shrimp Snap: Through Cavitating Bubbles”, *Science*, 289, Washington, American Association for the Advancement of Science, 2000, p. 2114-2117.
- Villanueva-Rivera, L.J., Pijanowski, B.C., Doucette, J., Pekin, B., “A primer of acoustic analysis for landscape ecologists”, *Landscape Ecology*, 26, New York, Springer Publishing, 2011, p. 1233-1246.