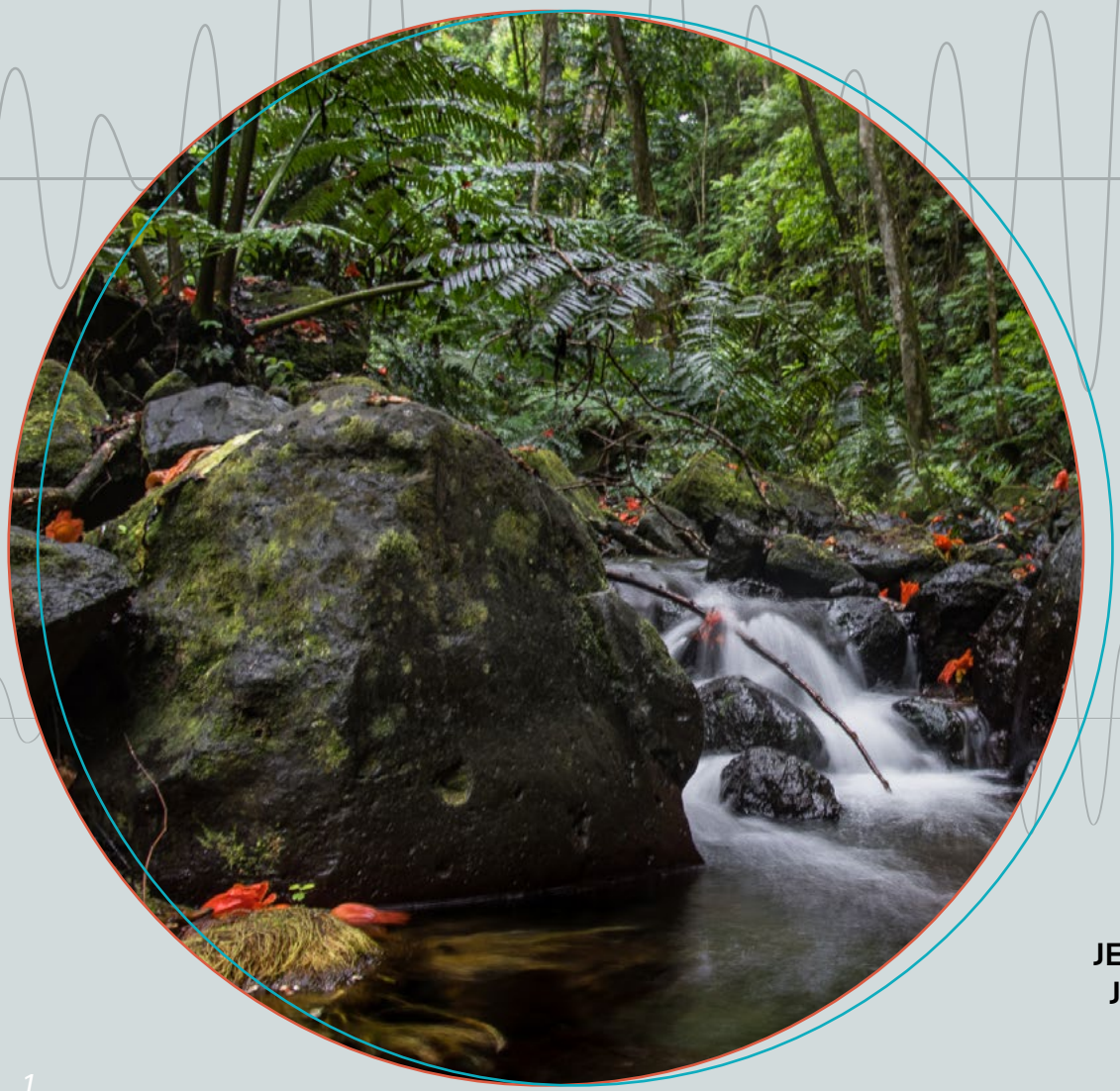
FONDATION biotope

DOCUMENTS TECHNIQUES de la Fondation Biotope

n° 3 Décembre 2025

La Symphonie des Îles : une étude exploratoire des paysages acoustiques de Tahiti et Moorea, Polynésie Française



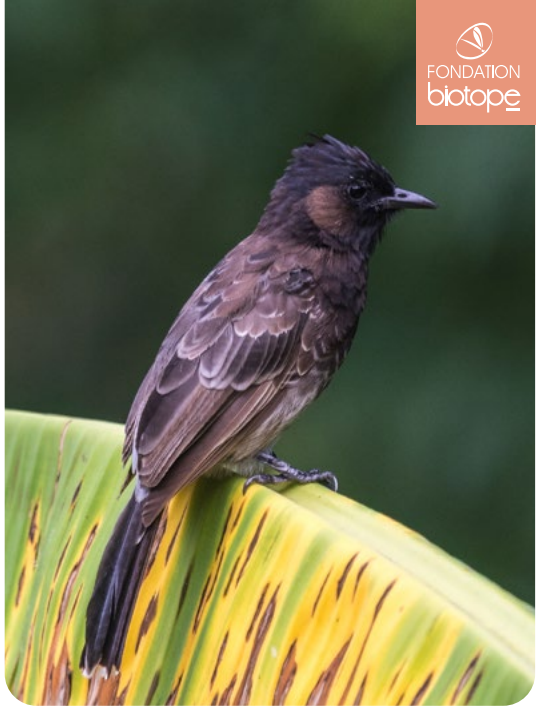
JEAN-YVES BARNAGAUD
JEAN-YVES HIRO MEYER
THOMAS GHESTEMME
NICOLAS MATHEVON

SOMMAIRE

Documents techniques de
la Fondation Biotope n°4 - Décembre
2025

La Symphonie des Îles : une étude exploratoire des paysages acoustiques de Tahiti et Moorea, Polynésie Française

Jean-Yves Barnagaud [1]
Jean-Yves Hiro Meyer [2,3]
Thomas Ghestemme [4]
Nicolas Mathevon [5,6]



Bulbul a ventre rouge Tahiti Arahurahu
Photo : Jean-Yves Barnagaud

Ce projet a reçu le soutien de l'École Pratique des Hautes Études et de la Fondation Biotope. L'équipe remercie la station du CRIOBE à Moorea pour son accueil et son soutien logistique. Cette mission exploratoire s'inscrit dans le cadre du projet SONGMAP (collaboration EPHE – ENES-Lab, Université de Saint-Etienne) et du projet ACOUCENE au Centre de Synthèse et d'Analyse sur la Biodiversité (Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité / Ministère de la Transition Ecologique / Office Français de la Biodiversité).

[1] *CEFE, Univ Montpellier, CNRS, EPHE-PSL University, IRD, 1919 route de Mende, 34293 Montpellier, France. jean-yves.barnagaud@ephe.psl.eu*
[2] *Délégation à la Recherche, Gouvernement de la Polynésie française, B.P. 20981, 98713 Papeete, Tahiti, Polynésie française*
[3] *UMR 241 SECOPOL, Tahiti, Polynésie française*
[4] *Société d'Ornithologie de Polynésie Manu, Boîte postale 7023 – 98719, Taravao, Tahiti, Polynésie Française*
[5] *ENES Bioacoustics Research Laboratory, CRNL, CNRS, Inserm, University of Saint-Etienne, Saint-Etienne, France.*
[6] *Ecole Pratique des Hautes Etudes, CHArt Lab, PSL University, France.*

Résumé

Les paysages acoustiques sont l'expression sonore des socio-écosystèmes, dont ils héritent des dynamiques spatio-temporelles issues d'interactions écologiques et culturelles complexes. Nous avons réalisé une étude exploratoire afin de déterminer les enjeux et possibilités de mise en place d'un suivi écoacoustique des écosystèmes de Tahiti et Moorea, en Polynésie Française. Les zones choisies correspondent à des vallées à enjeu particulier de conservation et un gradient altitudinal faisant l'objet d'un suivi de végétation à long terme. Les résultats préliminaires permettent de formuler des recommandations pour la planification et le dimensionnement d'un protocole de suivi acoustique à plus grande étendue spatiale et sur le temps long.

Introduction.....p3
Matériel et Méthodes.....p6
Résultats.....p13
Conclusion.....p19
Références.....p22

Photo de couverture :
Tahiti Papehue
Photo de Photo Jean-Yves Barnagaud

Fondation Biotope, 3 rue Mézin Gildon, 97354 Remire-Montjoly

ISSN : 3001-7262

INTRODUCTION

L'ORIGINE DE LA MISSION

LES FONDEMENTS THÉORIQUES

Au milieu du 20ème siècle, Olivier Messiaen composait son Catalogue d'Oiseaux (1958), une allégorie instrumentale composée de 13 pièces évoquant chacune une province française. Il expliquait l'œuvre ainsi :
« Chaque pièce est écrite en l'honneur d'une province française. Elle porte en titre le nom de l'oiseau-type de la région choisie. Il n'est pas seul : ses voisins d'habitat l'entourent et chantent aussi (...)- son paysage, les heures du jour et de la nuit qui changent ce paysage, sont également présents, avec leurs couleurs, leur température, la magie de leurs parfums. »
On pourrait difficilement mieux définir le « paysage sonore », une idée popularisée un peu plus tard par des preneurs de son – compositeurs dont les pionniers sont R.M. Schafer (Schafer, 1977) et Bernie Krause (2015). Un paysage est le plus souvent perçu comme l'arrangement d'un ensemble d'éléments géographiques sur un espace donné, au cours d'une durée donnée[1], mais on peut lui donner une définition plus intégrative, basée sur des interactions entre l'humain et le non-humain (Gobster & Xiang, 2012). Dès ses premières formulations, le paysage sonore s'est inscrit dans cette vision, qui repose sur une idée encore plus générale : le socio-écosystème, ou l'articulation des processus écologiques et culturels qui modèlent un réseau d'interactions sur un espace-temps[2] (Ostrom, 2009). Enregistrer un paysage sonore, c'est capturer une image acoustique de ces interactions, complémentaire de l'image visuelle que capture Ansel Adams dans ses photographies. Le représenter par la composition musicale, comme Olivier Messiaen, c'est en proposer un modèle qui stimule chez l'auditeur le ressenti réflexif sur ces interactions. Il favorise le sentiment d'appartenance à ce patrimoine, un objectif si fort que le législateur a ressenti le besoin de le sanctuariser à sa manière[3]. Mais dès lors que le paysage sonore devient un objet de protection, il devient nécessaire d'en étudier les dynamiques : qu'est-ce qui, dans l'espace ou dans le temps, en crée la typicité ? Comment est-il affecté par tel ou tel changement ?

Ce sont les questions d'une discipline scientifique encore jeune, l'écoacoustique (Farina, 2019)[4]. Eminemment interdisciplinaire, l'écoacoustique associe la bioacoustique (l'étude des sons issus du vivant), l'écologie spatiale (l'étude de la répartition géographique du vivant et de sa diversité), et l'analyse statistique pour répondre à un objectif : modéliser les structures spatio-temporelles du paysage acoustique par des méthodes quantitatives qui lui permettent de dialoguer avec les autres méthodes de suivi des socio-écosystèmes.
L'écoacoustique propose d'assigner au paysage sonore un objectif double : d'une part, mettre en valeur les dynamiques spatio-temporelles qui structurent l'espace de communication entre espèces – dont l'humain – qui utilisent l'acoustique pour interagir ; d'autre part, en faire un indicateur de biodiversité (Figure 1). L'hypothèse est plutôt simple : un paysage sonore est d'autant plus diversifié que les sons qui le construisent sont produits par une grande variété de sources, sans dominance particulière.

[1] https://education.nationalgeographic.org/resource/landscape/
[2] https://vimeo.com/197527849
[3] loi n° 2021-85 du 29 janvier 2021 visant à définir et protéger le patrimoine sensoriel des campagnes françaises
[4] Pour un exposé accessible sur l'écologie, voir Sueur J. Histoire Naturelle du silence. Actes Sud, 2023

La Polynésie française est un espace où se mêlent traditions anciennes et héritage culturel issus des premières populations humaines ayant colonisé les îles il y a environ 1000 ans, de profondes modifications imposées par les colonisateurs occidentaux depuis le 18ème siècle, et des écosystèmes naturels liés à un passé volcanique entre plusieurs dizaines de millions d'années pour les atolls à moins d'un million d'année pour les îles hautes comme Tahiti. Ecologiquement, elle consiste en un ensemble d'écosystèmes insulaires, structurés par l'isolement et des radiations évolutives qui donnent à archipel une flore et une faune singulière marquée par un fort taux d'endémisme (Florence, 1987; Thibault & Cibois, 2017). Pourtant, dès sa sortie de l'avion, le naturaliste se retrouve face à une réalité très différente de cet imaginaire. Le premier oiseau qu'il entend en sortant de l'aéroport de Papeete est probablement le Martin triste (*Acridotheres tristis*), la Géopélie zébrée (*Geopelia striata*) ou le Bulbul à ventre rouge (*Pycnonotus cafer*). Sa première visite dans les forêts du littoral et des basses vallées de Tahiti lui révèlera une flore très majoritairement introduite, soit par les premiers Polynésiens, soit par les Européens.

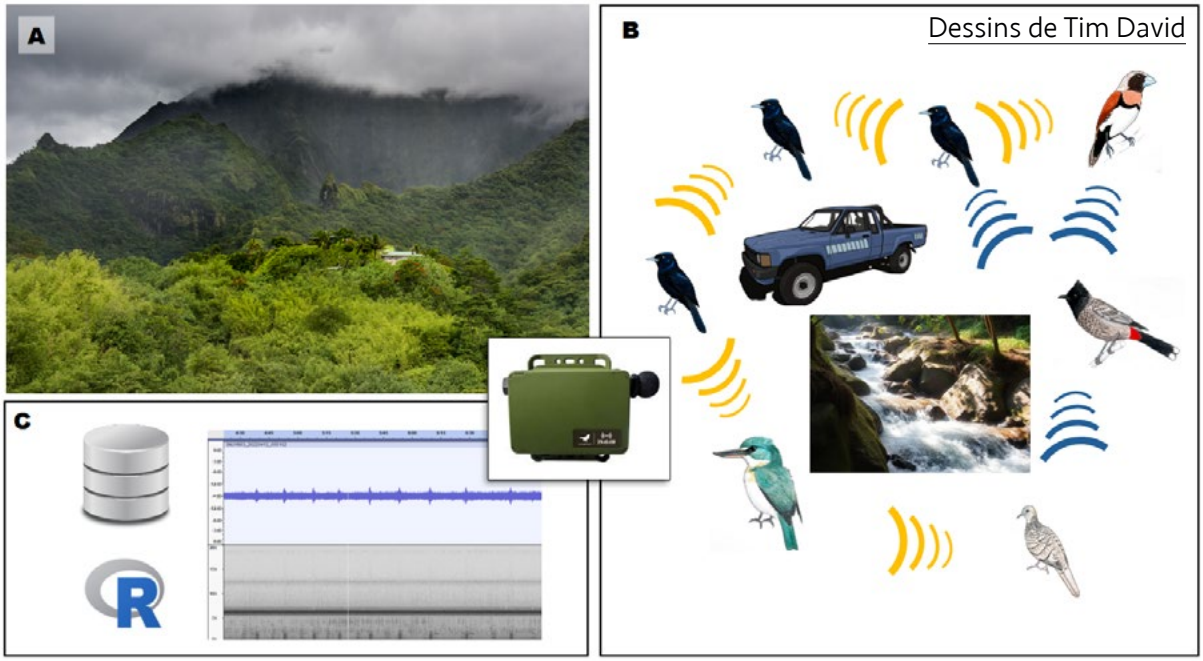


Figure 1. (A) Comme le paysage visuel, le paysage sonore émane des caractéristiques géographiques, biologiques et culturelles d'un lieu à un moment donné.

(B) Il est traditionnellement décomposé en trois sous-ensembles : la biophonie, sons émis par les organismes vivants volontairement (par exemple des oiseaux qui communiquent) ou involontairement (le bruissement de feuilles d'arbres) ; la géophonie, sons émis par les éléments abiotiques comme une rivière ; l'anthropophonie, sons émis volontairement ou involontairement par l'humain. Ces trois composantes interagissent : ainsi, la présence d'un véhicule ou la proximité d'un torrent peuvent altérer la communication entre deux oiseaux. Elles sont de plus poreuses. Ainsi, la biophonie implique tant les signaux émis par les espèces natives (ondes représentées en jaunes) que les espèces introduites (ondes bleues)

(C) Les pistes issues d'un enregistreur automatique contiennent la composante du paysage sonore capturée dans une bande de fréquence. Elles sont bancarisées puis traitées de deux manières : d'une part, une écoute et une visualisation de spectrogrammes, d'autre part, par l'analyse statistique de descripteurs quantitatifs de la diversité et de la complexité des sons.

En somme, le socio-écosystème polynésien est façonné par l'héritage de deux processus antagonistes : d'une part, l'extinction des espèces endémiques, notamment des oiseaux (50 espèces disparues depuis le 18ème siècle), dont seules une trentaine persistent encore à l'échelle de la Polynésie française, d'autre part plusieurs milliers d'années d'introduction assistée par l'humain d'espèces dont l'origine se trouve principalement en Asie du Sud-Est. Pour le Monarque de Tahiti (*Pomarea nigra*), un des rares passereaux endémiques qui subsistent encore à grands renforts d'actions de préservation de ses habitats et de réduction de la prédation (Blanvillain *et al.*, 2001, 2020), cette histoire a créé un environnement acoustique profondément polysémique. Sa niche acoustique, la gamme de sons qui constituent pour lui un ensemble de signaux intelligibles, se retrouve confrontée à de nouveaux signaux auxquels l'évolution ne l'avait pas préparé, à commencer par les omniprésents cris du Bulbul à ventre rouge et du Martin triste, deux des principaux prédateurs de ses œufs avec les rats (*Rattus* sp) (Thibault & Meyer, 2001 ; Thibault *et al.*, 2002 ; Blanvillain *et al.*, 2003 ; Le Bozec, 2005). Cet exemple emblématique n'est que la partie visible d'une conséquence bien plus englobante des extinctions et introductions d'espèces sur les îles. Plus encore que le paysage visuel, le paysage acoustique que le naturaliste de Polynésie française entend aujourd'hui ne ressemble probablement plus beaucoup à celui qui accueillit les premiers colonisateurs il y a plusieurs milliers d'années.

LE BUT DE L'ÉTUDE

Ce paysage acoustique composite n'en reste pas moins le reflet des interactions entre humains et biodiversité insulaire, et mérite à ce titre qu'on s'y intéresse au même titre que géographes, historiens et écologues du paysage explorent d'autres dimensions du patrimoine polynésien. C'est dans cet esprit que nous avons conçu ce projet exploratoire. Il n'existe, à notre connaissance, aucune caractérisation du paysage acoustique de Polynésie française, sauf peut-être des initiatives individuelles ou locales qui, si elles existent, mériteraient probablement d'être publicisées. Surtout, il n'existe pas de suivi du paysage acoustique sur des sites à enjeux particuliers, soit qu'ils servent de témoins des dynamiques de biodiversité, soit parce qu'ils font l'objet de mesures de conservation particulières. Dans une zone géographique où les moyens alloués à l'étude et la conservation des écosystèmes sont limités, le développement d'un suivi récurrent des paysages acoustiques peut remplir deux objectifs : d'une part, de sensibilisation des décideurs et du public, d'autre part, de mesure de l'évolution temporelle des écosystèmes terrestres.
Nous avons donc cherché, durant cette première étude exploratoire, à étudier la faisabilité d'un suivi écoacoustique des écosystèmes de Tahiti et Moorea dans l'archipel de la Société. A cette fin, nous avons identifié deux contextes d'étude :

- un premier ensemble de sites correspondant à des stations permanentes de suivi de la dynamique de la forêt dans le centre de l'île de Moorea, à proximité du Centre de Recherches Insulaires et Observatoire de l'Environnement - CRIOBE (Meyer *et al.*, 2024) ;
- un ensemble de deux vallées sur la côte Sud-Ouest de Tahiti, l'une faisant l'objet de mesures d'éradication du Bulbul à ventre rouge afin de préserver le Monarque de Tahiti, l'autre servant de site-témoin.

Pour cette première étape, nous avons enregistré les paysages acoustiques en parallèle d'une mission scientifique impliquant plusieurs projets en collaboration avec le CRIOBE. S'agissant d'une étude de faisabilité, nous n'attendions pas de résultat robuste à cette phase précoce. Les résultats présentés ici ont donc principalement vocation à exemplifier l'idée de paysage acoustique, le protocole à mettre en œuvre, le type d'analyse et de résultats que l'on peut extraire des enregistrements, et émettre quelques recommandations pour la mise en place d'un suivi de plus grande ampleur.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

RÉFÉRENCES

Nos méthodes se fondent sur les ouvrages classiques de l'écoacoustique. Les personnes intéressées par la mise en place d'une étude similaire pourront en particulier s'inspirer des références citées en table 1.

Table 1. Références choisies pour la mise en place et l'analyse d'un projet d'écoacoustique. Nous avons ajouté deux références postérieures à l'étude, qui résument de manière synthétique les lignes méthodologiques que nous recommandons pour la mise en place d'un protocole pérenne.

Sueur, J. (2018). Sound Analysis and Synthesis with R (1st ed. 2018 édition). Springer International Publishing AG. ***https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-77647-7***	Analyse des données écoacoustiques
Bradfer-Lawrence, T., Desjonqueres, C., Eldridge, A., Johnston, A., & Metcalf, O. (2023). Using acoustic indices in ecology: Guidance on study design, analyses and interpretation. Methods in Ecology and Evolution, 14(9), 2192–2204. ***https://doi.org/10.1111/2041-210X.14194***	Exploitation des indices écoacoustiques pour la caractérisation des paysages sonores
Metcalf, O., Abrahams, C., Ashington, B., Baker, E., Bradfer-Lawrence, T., Browning, E., Carruthers-Jones, J., Darby, J., Dick, J., Eldridge, A., Elliott, D., Heath, B., Howden-Leach, P., Johnston, A., Lees, A., Meyer, C., Ruiz Arana, U., & Smyth, S. (2023). Good practice guidelines for long-term ecoacoustic monitoring in the UK (pp. 1–82) [Report]. The UK Acoustics Network. ***https://acoustics.ac.uk/***	Bonnes pratiques pour la mise en place d'un protocole de suivi des paysages sonores et l'analyse des données
Gasc, A., Pavoine, S., Lellouch, L., Grandcolas, P., & Sueur, J. (2015). Acoustic indices for biodiversity assessments: Analyses of bias based on simulated bird assemblages and recommendations for field surveys. Biological Conservation, 191, 306–312. ***https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.06.018***	Recommandations de terrain pour la production d'indices écoacoustiques interprétables

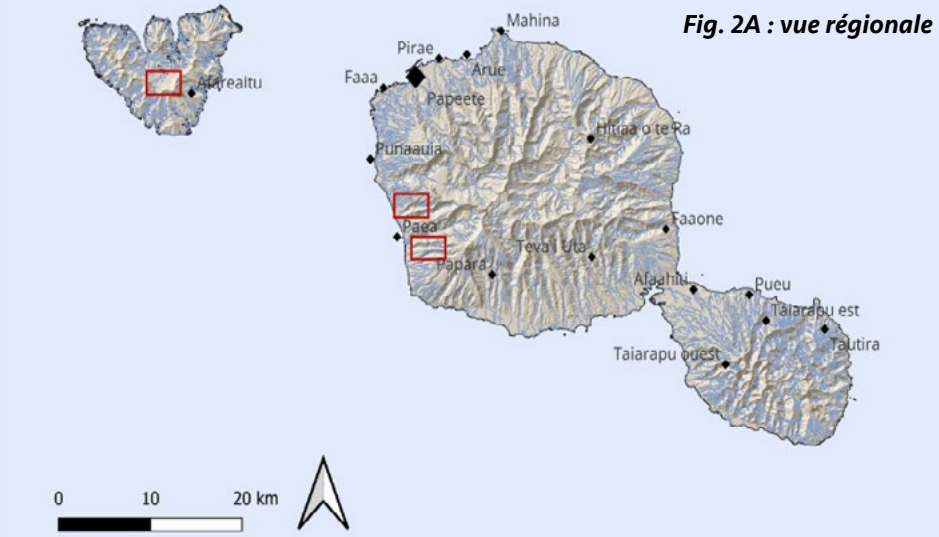


Fig. 2A : vue régionale

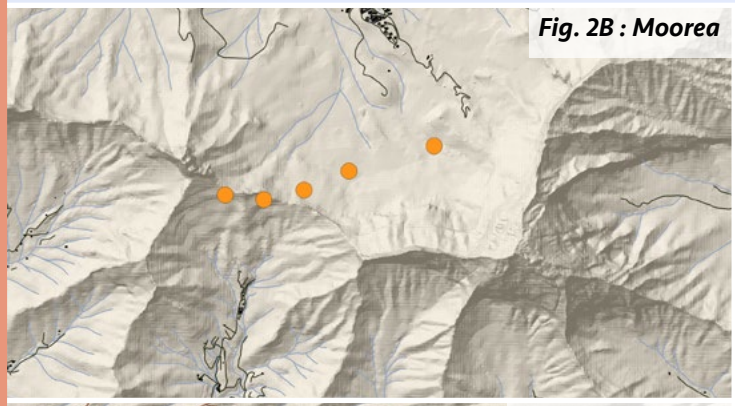


Fig. 2B : Moorea



Moorea, col des cocotiers - Photo : Jean-Yves Barnagaud

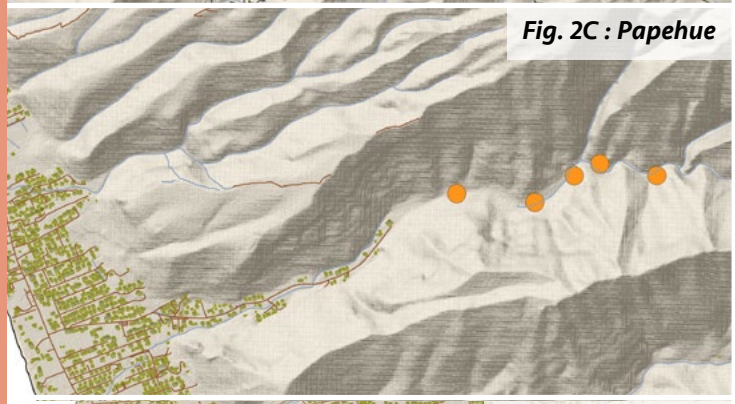


Fig. 2C : Papehue



Tahiti - vallée de Papehue - Photo : Jean-Yves Barnagaud

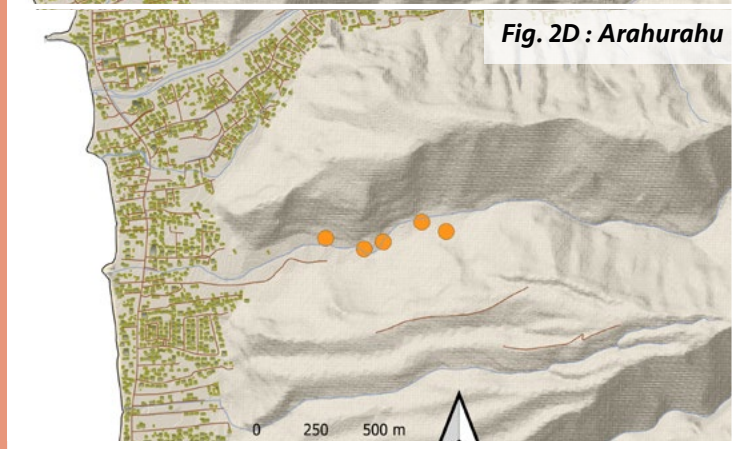


Fig. 2D : Arahurahu



Moorea - Col des Cocotiers - Photo : Jean-Yves Barnagaud

Figure 2 : Localisation des sites d'étude. Les points oranges indiquent le positionnement des enregistreurs.

Les sites d'études sont établis sur trois secteurs (***fig. 2A***) :

• Moorea, entre le Belvédère ddu domaine de Opunohu et le Col des Trois Cocotiers (***fig.2B***) : cette zone forestière fait l'objet d'un suivi pluriannuel de la végétation (Meyer *et al.*, 2024).

Son principal intérêt pour l'écoacoustique réside dans sa diversité des types de forêt en terme de composition et de structures, allant de forêts hygrophiles au sous-bois ombragé (forêts tropicales humides typiques)dans les parties basses, souvent envahies par des arbres introduits comme le miconia (*Miconia calvescens*) et le tulipier du Gabon (*Spathodea campanulata*) à des milieux semi-ouverts sur les crêtes, plus diversifiées en plantes indigènes et endémiquesL'intérêt principal de ce site est la possibilité d'y mettre en place un suivi pluriannuel dans lequel les variations de paysages sonores pourraient être associés à des mesures de biodiversité, dont certaines pré-existent, permettant d'étudier la relation entre indicateurs écologiques et acoustiques.

• Tahiti, vallée de Papehue (***fig. 2C***) : cette étroite vallée forestière s'étale autour d'un gros torrent. Elle est relativement homogène en structure et composition sur le tronçon étudié. Son principal intérêt est de faire l'objet de mesures de restauration de l'habitat et de régulation du Bulbul à ventre rouge pour la protection des espèces endémiques, dont l'espèce phare est le Monarque de Tahiti. Elle est par ailleurs d'accès restreint, ce qui n'annihile pas toute présence humaine mais la réduit substantiellement. L'idée d'échantillonner cette vallée est prioritairement d'étudier les impacts des mesures de conservation sur le paysage sonore. Néanmoins, notre étude est trop préliminaire pour ambitionner des résultats robustes sur cet aspect.

• Tahiti, vallée de Arahurahu (***fig. 2D***) : cette vallée est très similaire à la vallée de Papehue, dont elle est proche, tant en termes de topographie que de configuration, composition et structure de la végétation. Elle ne fait l'objet d'aucune mesure de conservation, résultant en des densités de bulbuls plus élevées et une fréquentation humaine plus intense en raison d'un site archéologique (temple ou « marae ») visité par les touristes et fréquentés par les riverains. Ce dernier site est identifié comme témoin dans la perspective d'une évaluation à venir des impacts de mesures de conservation.



Moorea
Photo : melanie-renaud.com

Moorea
Photo : melanie-renaud.com

L'ENREGISTREMENT DES PAYSAGES SONORES

Les paysages sonores sont enregistrés au moyen d'enregistreurs Wildlife Acoustics SM Mini équipés de microphones enregistrant dans la gamme de fréquences de l'audible humain (figure 3).



Tahiti - vallée de Papehue
Photo : Jean-Yves Barnagaud

Figure 3. Pose d'un enregistreur Wildlife Acoustics SM Mini dans la vallée de Papehue.

Cela exclut certains chiroptères et insectes, mais est cohérent avec la définition patrimoniale et culturelle du paysage sonore. Les enregistreurs choisis sont un compromis entre portabilité, robustesse et qualité acoustique, et forment un standard pour ce type d'étude. Ils sont positionnés sur des supports naturels (le plus souvent des arbres), à 1m50-1m80 du sol, et laissés sur place pendant 48h (les enregistreurs de Moorea n'ont effectué que quelques heures d'enregistrements en journée à cause d'une défaillance de l'application de paramétrage). Le paramétrage complet est précisé en table 2.

Table 2. Paramétrage des enregistreurs SM Mini.

Item	***Paramétrage***
Taux d'échantillonnage	48kHz
Mode d'enregistrement	Qualité maximale
Longueur maximale des fichiers	30 minutes
Canal	Mono (gauche)
Gain	18dB
Programme	Audible - continu

Sur le site de Moorea, les enregistreurs sont positionnés sur les placettes de suivi de la végétation, le long du chemin d'accès au Col des Cocotiers entre environ 250 et 420 m d'altitude. Sur les sites de Papehue et Arahurahu, les enregistreurs sont positionnés le long de la rivière, en surplomb, sur un gradient aval – amont.

L'ANALYSE DES DONNÉES

Les enregistrements ont d'abord été sondés par écoute au casque pour identifier les particularités de chaque site et d'éventuelles défaillances. Dans un deuxième temps, nous avons calculés des indices écoacoustiques (table 3), qui décrivent les caractéristiques fréquentielles et temporelles du paysage sonore (Bradfer-Lawrence *et al.*, 2023). Parmi le large panel d'indices disponibles, nous avons retenu ceux qui sont les plus aisément interprétables par un écologue non expert en analyse de signal acoustique. Nous avons calculé chaque indice pour chaque enregistreur, sur des pas de temps de 5 minutes, ensuite agrégés sur des pas de temps de 30 minutes afin de lisser la variation temporelle aléatoire. Une étude plus poussée préserverait probablement la résolution initiale de 5 minutes, mais nous avons ici choisi de privilégier la lisibilité d'analyses statistiques simples plutôt que l'usage de techniques de modélisation avancées. Le lecteur souhaitant aller plus loin dans la compréhension des méthodes d'analyse de données écoacoustiques pourra se référer à Sueur (Sueur, 2018).

Table 3. Indices écoacoustiques utilisés dans cette étude. Cette table est inspirée de Barbaro *et al*. (2022).

acronyme	***indice***	***Définition***	***interprétation***
ACI	Indice de complexité acoustique	Variations d'amplitude entre bandes de fréquences par intervalles de 5 secondes	Une valeur élevée traduit un paysage sonore constitué d'une grande diversité de sources sonores, typiquement lorsque la biodiversité est élevée
ADI	Indice de diversité acoustique	Indice de Shannon des bandes de fréquence	Un ADI élevé correspond à un paysage sonore silencieux ou dans lequel toutes les bandes de fréquences sont également représentées. Un ADI faible traduit un paysage sonore dominé par une source unique et constante de son
BIOAC	Indice bioacoustique	Aire du spectre d'amplitude sur la bande 2-10kHz	Cet indice augmente avec l'alternance de bandes de fréquences à forte ou faible amplitude, caractéristiques d'une grande diversité d'émetteurs biologiques.
H	Indice d'entropie acoustique	Produit des indices de Shannon sur l'enveloppe d'amplitude et sur le spectre de fréquence	Les valeurs faibles correspondent à des enregistrements silencieux ou dans lesquels les sons sont répartis équitablement entre bandes de fréquences. Les H les plus élevés sont dans des paysages sonores dominés par une unique bande de fréquences.
NDSI	Indice normalisé de paysage sonore	Ratio des densités spectrales des basses et hautes fréquences	Des valeurs faibles traduisent la prédominance de basses fréquences associées à l'humain ou à certains éléments de géophonie (grondement de torrent, mer). Les hautes fréquences sont surtout d'origine biologique mais peuvent aussi être émises par l'humain
NP	Nombre de pics de fréquence	Nombre de pics principaux de fréquence dans le spectre	Un grand nombre de pics signe un paysage sonore hétérogène, souvent associé à de nombreuses émissions d'origine biologique

Nous avons effectué l'ensemble des analyses sous R version 4.4.1, avec les librairies soundecology (Pijanowski, 2018) et seewave (Sueur *et al.*, 2008), ainsi qu'un script modifié à partir d'une ressource disponible en ligne sur le GitHub d'Amandine Gasc (IRD)1 pour le calcul des indices. La table des indices et les scripts R permettant le calcul sont disponibles publiquement sur [archive en ligne à créer sur datagouv].

Les analyses statistiques consistent en des statistiques exploratoires, une analyse en composantes principales (ACP) pour l'exploration des relations entre indices et des similitudes entre sites, et une courbe de lissage spline pour les séries temporelles.



Moorea
Photo : melanie-renaud.com

RÉSULTATS

Nos méthodes se fondent sur les ouvrages classiques de l'écoacoustique. Les personnes intéressées par la mise en place d'une étude similaire pourront en particulier s'inspirer des références citées en table 1.

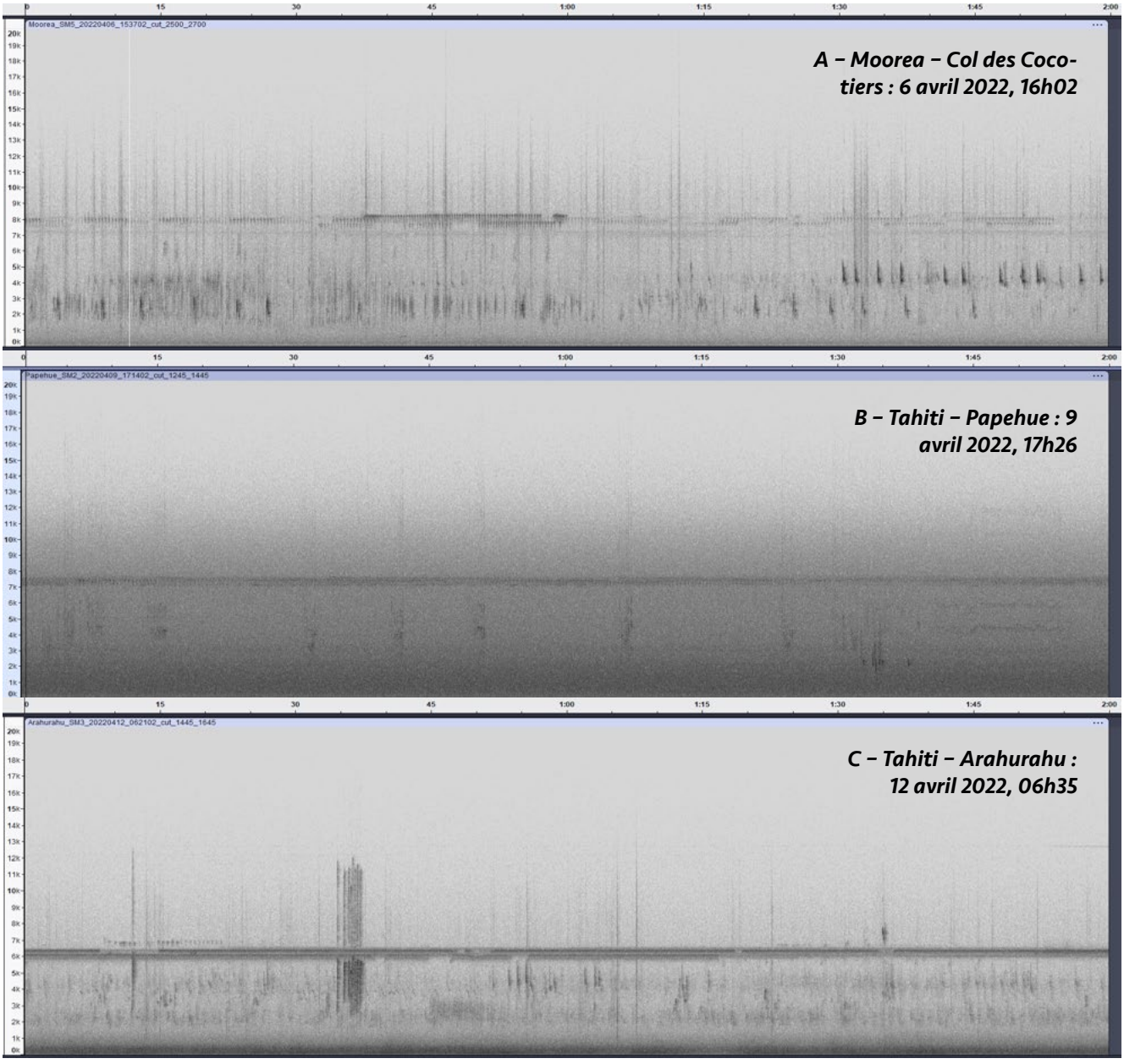


Figure 4. Trois exemples de paysages sonores. (A) Sur le Col des Cocotiers, le paysage sonore est nettement dominé par des vocalises d'oiseaux et d'insectes. (B) Dans la vallée de Papehue, la piste est saturée par les basses fréquences émises par la rivière ; seuls subsistent les chants et cris émis par des oiseaux proches (dont des Bulbuls, malgré les mesures d'éradication) et, entre 7 et 8 kHz, un bruissement continu d'insectes. (C) On retrouve les insectes sur le site d'Arahurahu, cette fois plutôt autour de 6.5-7kHz, signant probablement une espèce différente. Sur ce site, aucun torrent ne noie le paysage sonore, révélant un mélange de chants d'espèces (quasi exclusivement introduites), les basses fréquences émises par la mer au loin, et des bribes d'anthropophonie associées à l'urbanisation toute proche.

IMPRESSION GÉNÉRALE

L'écoute préliminaire a révélé des paysages sonores globalement peu fournis en sons et peu diversifiés, avec de nombreuses plages de temps sans émissions d'origine biologique à l'exception d'une bande 6-8kHz occupée par des chants quasi-continus d'insectes (figure 4). On ne retrouve pas dans ces enregistrements l'idée que l'on peut se faire, à la visualisation des images, de forêts riches en sons tropicaux – conséquence probable de la combinaison de l'isolement insulaire et des extinctions d'espèces passées. De fait, les sons biologiques sont très largement dominés par des espèces d'oiseaux forestières introduites (principalement le Bulbul à ventre rouge, le Zostérops à dos gris *Zosterops lateralis*) et d'animaux domestiques (notamment chiens et coqs), les vocalises d'espèces natives étant ponctuelles (Martin-chasseur vénéré *Todiramphus veneratus* à Tahiti, Martin chasseur de Young *Todiramphus youngi* à Moorea, Salangane de la Société *Aerodramus leucophaeus*). Ces résultats s'accordent bien avec l'impression de terrain : à un paysage visuel marqué par la complexité topographique et végétale répond un paysage sonore simple, variant relativement peu d'un site à l'autre.

CARACTÉRISATION DU PAYSAGE SONORE

Nous séparons les paysages sonores diurnes et nocturnes pour deux raisons : d'une part, il n'y a pas eu d'enregistrement nocturne sur la zone de Moorea à cause d'une défaillance de l'application de programmation des enregistreurs ; d'autre part, les rythmes circadiens induisent des contrastes forts qui noient le reste de la variabilité d'intérêt.

La figure 5 présente une analyse en composante principale (ACP) des indices écoacoustiques décrits en table 2. Sur cette représentation graphique, chaque point correspond à un fichier son de 30 minutes, caractérisé par l'association des cinq indices. La cartographie des points sur l'espace graphique représente donc les dissimilarités entre enregistrements : plus deux points sont proches, plus ils correspondent à des enregistrements de paysages acoustiques similaires. Des analyses statistiques plus complètes seraient nécessaires pour une caractérisation fine des variations entre enregistreurs, entre zones et entre périodes, mais pour cette étude exploratoire, cet espace d'ACP donne déjà quelques éléments d'interprétation. Concrètement, on peut synthétiser la variation des paysages sonores diurnes selon deux grands gradients :

- un gradient dominant opposant des sites à ADI/BIOAC élevées à des sites à NP/ACI élevés (axe horizontal sur la figure 5 – haut). Ce gradient peut s'interpréter comme une variation de complexité des paysages sonores, allant de sites où toutes les bandes de fréquences sont occupées de manière régulière (valeurs négatives – gauche de la figure) à des sites aux paysages sonores plus hétérogènes et chaotiques (valeurs positives – droite de la figure) ;

- un gradient secondaire (axe vertical sur la figure 5 - haut) opposant des sites dominés par des sons à haute fréquence (NDSI élevée), associés à de nombreux pics de fréquences (NP élevée) mais assez peu de variations d'amplitude (ACI faible), à des sites caractérisés par des variations d'amplitudes et des basses fréquences.

Les trois zones se recoupent assez largement dans cet espace, signant des paysages sonores peu différenciés mais structurés de manière hétérogène :

• **les enregistrements de Moorea** se différencient principalement par le NDSI et l'ACI, c'est-à-dire par les fréquences dominantes et leur hétérogénéité temporelle. Cela correspond bien à des hétérogénéités d'habitats, certains enregistreurs étant placés en sous-bois, d'autres dans les milieux semi-ouverts d'altitude ;

• **les enregistrements de Papehue** s'alignent sur une diagonale allant de paysages sonores caractérisés par la variabilité temporelle en fréquences (ACI élevée) à des paysages sonores dans lesquels toutes les bandes de fréquences sont occupées équitablement. Cette caractérisation est à tempérer, la totalité des enregistrements étant en réalité noyés par la proximité de la rivière qui occupe l'essentiel du spectre, ne laissant passer que quelques émissions biologiques (oiseaux et insectes) proches du micro) ;

• **les enregistrements de Arahurahu** sont les plus diversifiés et reflètent l'ensemble des deux gradients. Cette lecture est cohérente avec celle de l'impression de terrain : un site dans lequel les émissions humaines sont présentes mais non dominante, aucun élément géophonique susceptible de noyer les enregistrements comme à Papehue, et par conséquent des enregistrements dominés par les variations biophoniques.

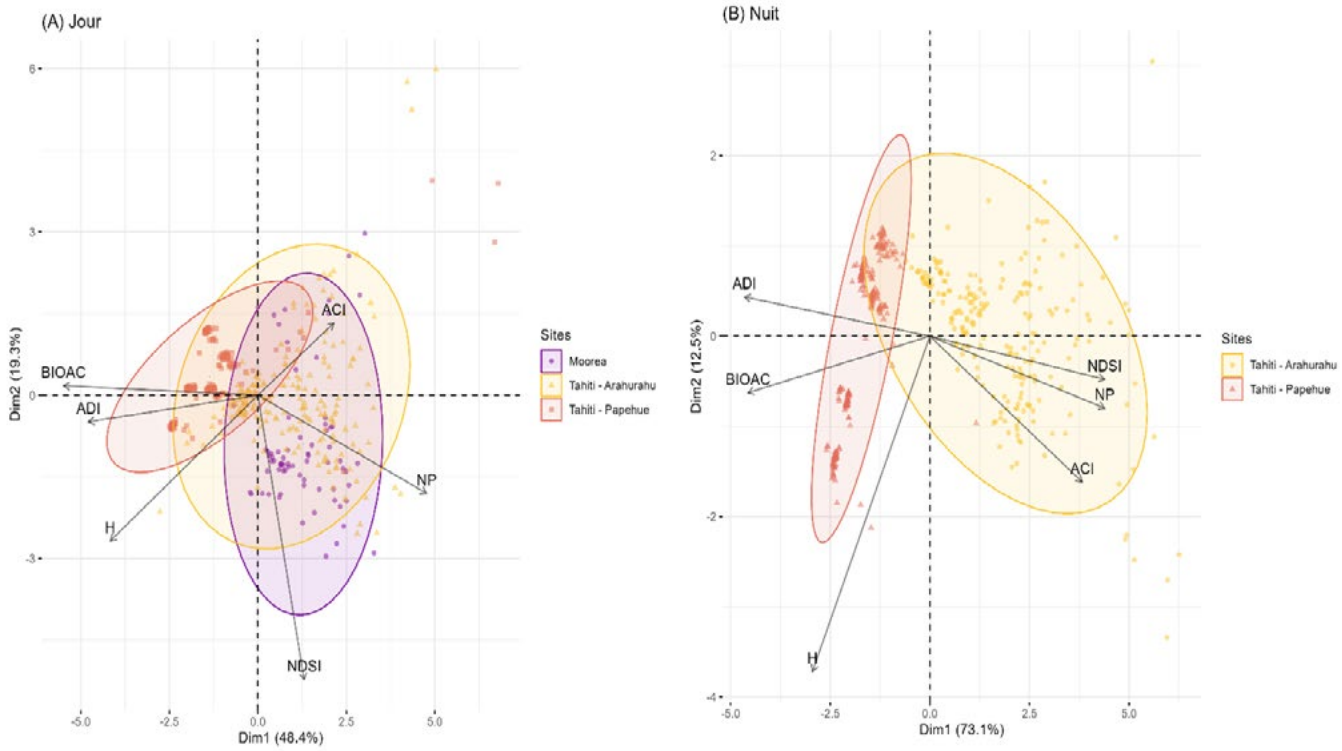


Figure 5. Les paysages sonores vus par les indices écoacoustiques. Ces projections issues d'analyses en composantes principales montrent les corrélations entre les indices (flèches) et les similitudes entre séquences d'enregistrement (points), regroupées par zones d'étude pour faciliter la lecture. L'analyse est séparée entre jour (A) et nuit (B), afin d'éviter que les rythmes circadiens ne capturent toute la variabilité des données. Les ellipses contiennent 95% des enregistrements pour chaque zone. Les deux axes correspondent aux gradients de paysages sonores dominants (voir texte pour l'interprétation narrative).

DIFFÉRENCES SPATIALES ENTRE ZONES D'ÉTUDE

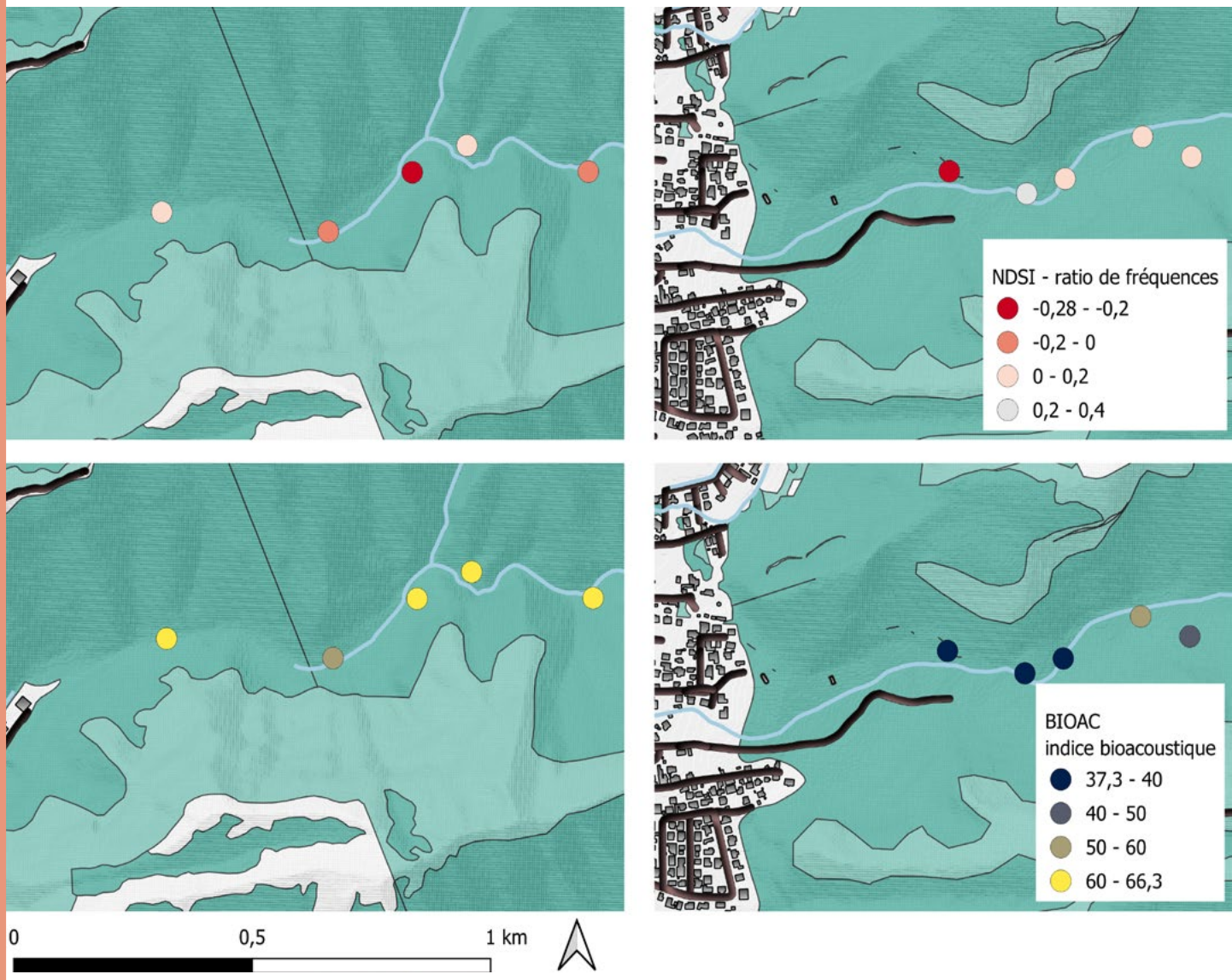


Figure 6. Variations du NDSI (haut) et de l'indice bioacoustique (bas) entre enregistreurs sur les sites de Papehue (gauche) et de Arahurahu (droite). Des éléments d'interprétations des indices sont en table 2. Fond de carte : occupation du sol (***https://www.data.gouv.fr/datasets/base-de-donnees-cartographique-vectorielle/***), les deux sites sont entièrement couverts de végétation forestière.

Nous limitons la présentation des cartographies d'indices acoustiques aux deux qui nous semblent les plus faciles à interpréter, l'indice bioacoustique (BIOAC) et le NDSI (ratio hautes/basses fréquences). La figure 6 en montre les niveaux moyens diurnes entre enregistreurs pour les vallées de Papehue et de Arahurahu ; Moorea est exclue car nous considérons que les enregistrements ne couvrent pas une période suffisamment longue (moins d'une journée). L'indice bioacoustique est nettement plus élevé sur Arahurahu que sur Papehue, conséquence directe de la saturation du paysage sonore par la rivière sur ce deuxième site. Il convient donc de ne pas surinterpréter la représentativité de cet indice pour décrire la biodiversité acoustique locale.

Le NDSI indique une prédominance des hautes fréquences à Papehue, un résultat également difficile à interpréter pour la même raison. Si l'on se concentre sur le site de Arahurahu (gauche de la figure 6), on remarque des variations à grain fin des valeurs de NDSI d'un enregistreur à l'autre, l'indice bioacoustique étant plus uniforme. Cela peut impliquer que les sources d'émissions sonores sont structurées spatialement à l'intérieur de la vallée, mais seule une réplication plus poussée (voir le chapitre Discussion) permettra de tirer de véritables interprétations de cette hétérogénéité.

VARIABILITÉ TEMPORELLE

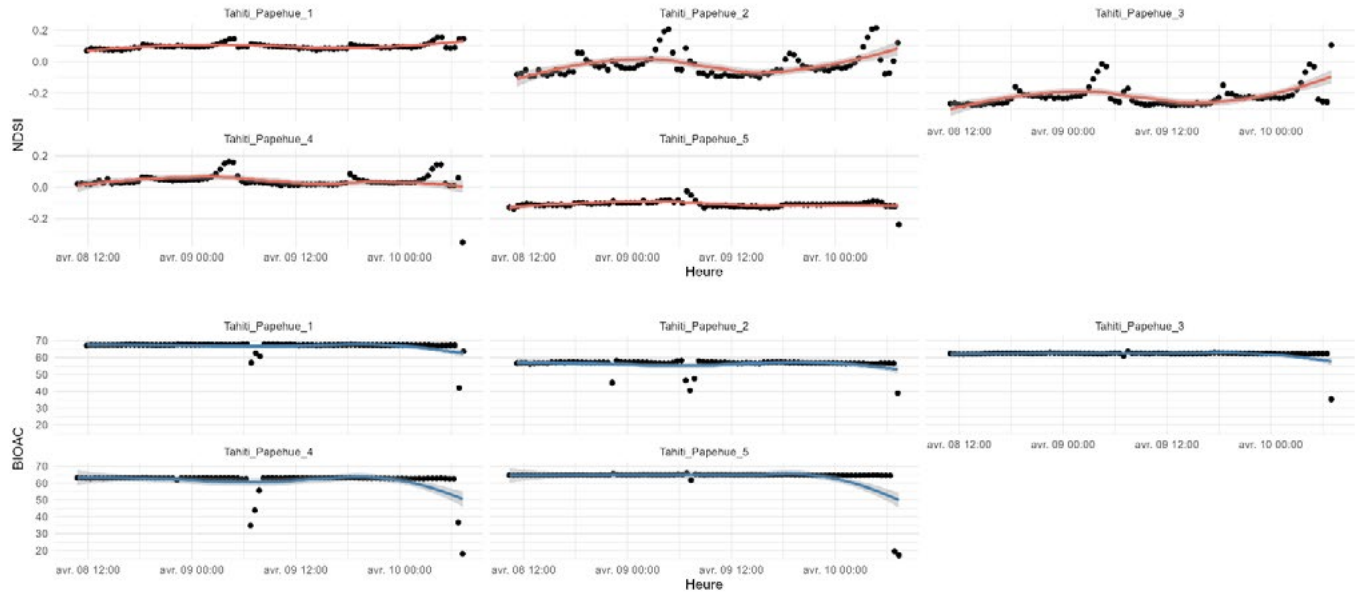


Figure 7. Variations temporelles du NDSI (haut) et de l'indice bioacoustique (bas) sur le site de Papehue. Chaque point représente une période de 30 minutes. La courbe est une fonction de lissage loess, avec un intervalle de confiance à 95%.

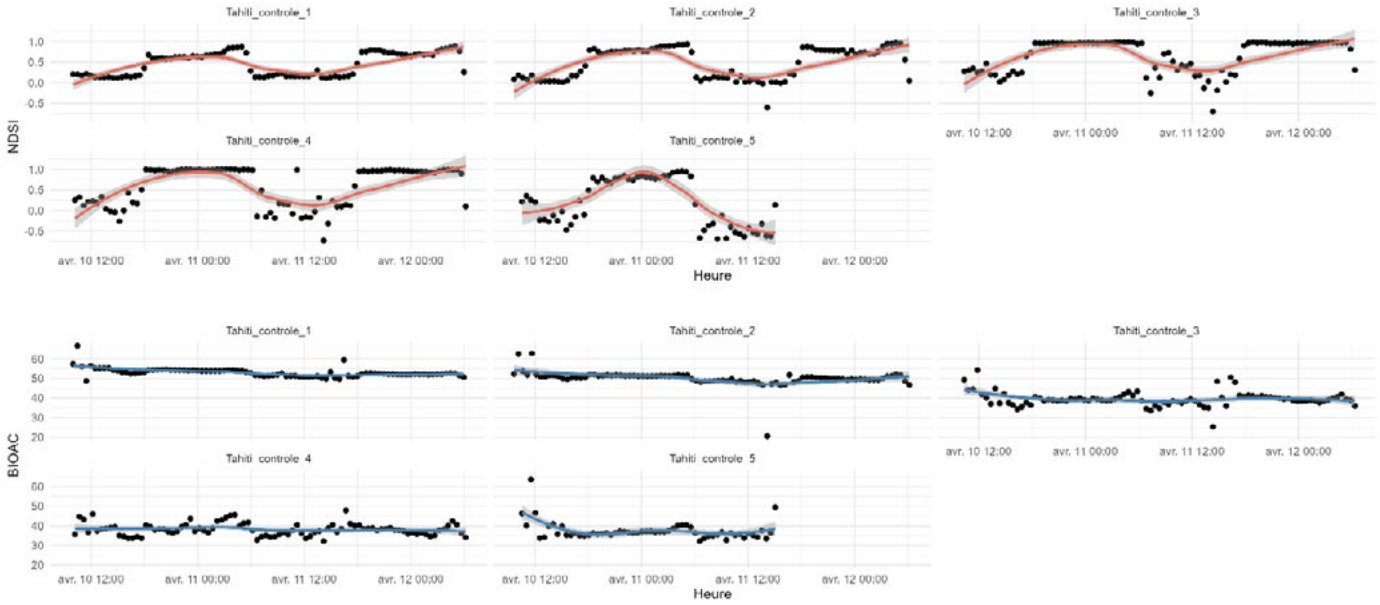


Figure 8. Variations temporelles du NDSI (haut) et de l'indice bioacoustique (bas) sur le site d'Arahurahu. Chaque point représente une période de 30 minutes. La courbe est une fonction de lissage loess, avec un intervalle de confiance à 95%.

La variabilité temporelle des paysages sonores est plutôt faible (figures 7 et 8, mêmes sites et indices qu'en figure 6). Le NDSI est plus élevé en cours de nuit à Arahurahu (figure 8 haut), avec des modulations selon les enregistreurs, possiblement du fait de la prédominance des sons d'insectes. En revanche, l'indice bioacoustique reste constant, avec de petites fluctuations aléatoires d'une période de 30 minutes à l'autre qui correspondent à des pics locaux d'activité des oiseaux. A Papehue, la variabilité temporelle est largement tamponnée par le flux permanent de la rivière. On retrouve dans ce patron l'impression de terrain d'un paysage sonore relativement uniforme, avec des pics aléatoires d'activité chez les oiseaux, souvent initiés par les bulbuls.

RECOMMANDATIONS POUR LA MISE EN PLACE D'UN SUIVI DES PAYSAGES SONORES TERRESTRES EN POLYNÉSIE

Cette étude préliminaire révèle des paysages sonores homogènes, marqués par de petites fluctuations à grain spatial fin et une variabilité temporelle peu structurée, en dehors du rythme jour-nuit qui semble influer surtout sur les fréquences dominantes. Les résultats quantitatifs reflètent bien l'impression de terrain, suggérant que les indices écoacoustiques pourraient être des outils appropriés pour mettre en place un suivi de la biodiversité acoustique dans les habitats forestiers de Tahiti et Moorea.
Nous ne tirons aucune conclusion de fond de cette étude de faisabilité, dont le plan d'échantillonnage reste insuffisant par rapport aux recommandations issues de la littérature spécialisée pour la mise en place d'un suivi des paysages sonores (Bradfer-Lawrence *et al.*, 2023 ; Metcalf *et al.*, 2023). A partir de ces recommandations et des constats du terrain, les caractéristiques d'un tel suivi à Tahiti et Moorea pourraient être les suivantes :

> • vu l'homogénéité locale du paysage sonore, il semble préférable de privilégier le nombre de zones par rapport à la densité d'enregistreurs par zones. Sur des périmètres similaires à ceux de cette étude pilote, en habitat homogène, trois enregistreurs peuvent probablement suffire ;
> • en revanche, une meilleure couverture de la diversité des habitats pourrait être assurée en multipliant les zones. Le schéma classique croise un gradient d'urbanisation et un gradient de fermeture du milieu. Un schéma alternatif pourrait se focaliser sur des zones d'intérêt, par exemple des espaces naturels sensibles ou faisant l'objet de mesures de conservation (comme la vallée de Papehue), à partir du moment où des zones témoin sont précautionneusement choisies ;
> • nous recommandons l'extension temporelle du suivi à des séquences d'au moins 5 jours et 5 nuits consécutifs afin de représenter correctement le rythme journalier des paysages sonores. Une réplication saisonnière serait nécessaire.

Nous avons basé notre plan d'échantillonnage préliminaire sur les recommandations des naturalistes locaux, qui se sont avérées précieuses mais ont omis certains facteurs qui nécessitent un minimum d'acculturation aux enjeux des suivis acoustiques. En particulier, le site de Papehue s'est avéré inexploitable pour les objectifs définis du fait de la présence de la rivière. Cette limite peut être évitée par une formation préliminaire minimale, de l'ordre de quelques heures, des opérateurs qui effectuent le repérage de terrain.
La mise en place des enregistreurs elle-même nécessite peu de temps (quelques minutes), l'essentiel du temps passé sur le terrain étant lié aux transits entre sites : l'implication des experts locaux n'en est que plus nécessaire. Par ailleurs, le matériel s'est avéré robuste aux aléas météorologiques et en particulier aux fortes pluies.

CONCLUSION

LES REGARDS CROISÉS DE L'ÉTUDE

JEAN-YVES HIRO MEYER, DÉLÉGATION À LA RECHERCHE DE LA POLYNÉSIE FRANÇAISE



L'enregistrement des paysages acoustiques présente un intérêt particulier pour la détection d'espèces rares ou discrètes, dans des habitats peu prospectés et difficiles d'accès. Cette perspective permettrait notamment d'améliorer le suivi d'espèces rares et localisées comme la Rousserolle de Tahiti (*Acrocephalus caffer*), encore commune dans quelques vallées comme Papenoo, ou l'Hirondelle de Tahiti *Hirundo tahitica*. Au-delà d'une démarche d'inventaire, le recours aux enregistreurs automatiques permettrait de documenter leurs vocalisations et les éventuelles perturbations de leur environnement sensoriel par des effets anthropiques actuellement mal connus.

Par ailleurs, la connaissance de la structure des gradients de diversité des écosystèmes terrestres est encore parcellaire en Polynésie française, principalement parce que les moyens alloués sont prioritairement dirigés vers les espèces à enjeu immédiat de conservation. Le déploiement d'enregistreurs automatiques présente à cet effet trois avantages.

En premier lieu, le recours à l'écoacoustique permet de disposer d'indices intégratifs, directement corrélés à l'ensemble des facettes de la biodiversité d'un écosystème [REF], mais qui ne nécessitent pas une connaissance taxonomique experte. Ces indices présentent donc un intérêt limité pour une connaissance fine des compositions spécifiques, mais ils constituent un moyen de construire un observatoire de la dynamique d'ensemble des écosystèmes dans le temps et l'espace. Ainsi, le déploiement d'enregistreurs sur des gradients altitudinaux longs (jusqu'à 2000 m d'altitude à Tahiti) constituerait un moyen réaliste d'étudier des communautés écologiques impliquant des changements marqués de communautés (par exemple, les martin-chasseurs et ptilopes de la Société sont inconnus au-dessus de 1000 m, où d'autres oiseaux comme le busard de Gould y sont présents). De la même manière, l'écoacoustique peut faciliter l'inventaire dynamique d'habitats menacés par l'urbanisation, comme les prairies salées ou les forêts marécageuses de sub-mangove, habitats essentiels pour quelques espèces aquatiques nicheuses (Canard à sourcil *Anas superciliosa*, Aigrette des récifs *Egretta gularis*, Héron strié *Butorides striatus patruelis* à Tahiti) et migratrices (Pluvier fauve, *Pluvialis fulva*, Chevalier errant, *Tringa incana*).

THOMAS GESTHEMME, DIRECTEUR GÉNÉRAL DE LA SOP-MANU



L'écoacoustique propose une nouvelle opportunité de documenter les dynamiques temporelles de l'avifaune sur le long terme, en permettant un échantillonnage d'habitats et un gradient altitude que ne permettent pas de manière récurrente les seuls moyens humains. En particulier, la récurrence des épisodes de sécheresse et de tempêtes majeures, qui s'accroît sous l'effet des changements climatiques, nécessite le déploiement d'un dispositif de suivi pérenne des écosystèmes insulaires. Des enregistreurs automatisés, déployés sur de multiples atolls et dans des vallées reculées de Tahiti, peuvent à cette fin complémenter efficacement les campagnes menées par les experts naturalistes sur le terrain.

Par ailleurs, l'enregistrement automatisé est l'un des meilleurs moyens de suivre la dynamique des oiseaux marins nicheurs, et notamment des pétrels, loquaces la nuit et nichant souvent dans des zones qui ne peuvent être suivies de manière régulière par des opérateurs. Enfin, l'augmentation de la durée de suivi permise par ces dispositifs permettra peut-être de découvrir de nouvelles espèces ou redécouvrir des espèces considérées comme éteintes, apportant un soutien précieux à la connaissance du patrimoine naturel de Polynésie.

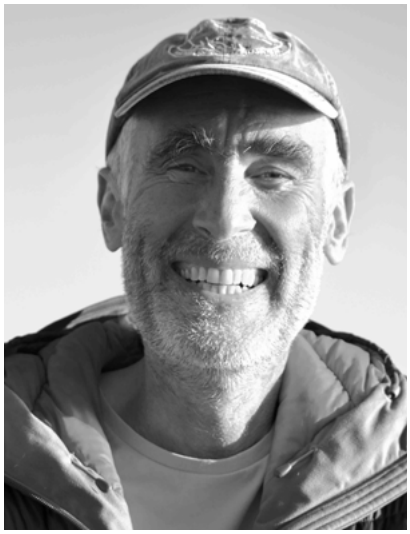
JEAN-YVES BARNAGAUD, ÉCOLOGUE, ECOLE PRATIQUE DES HAUTES ETUDES



La mise en place d'un programme écoacoustique en Polynésie française sur le long terme est une opportunité réelle pour l'inventaire et le suivi de la biodiversité insulaire, mais c'est aussi une manière de redécouvrir le patrimoine naturel des îles à travers sa composante sensorielle. Outil de science comme d'appropriation par de multiples publics, le paysage sonore permet littéralement à un socio-écosystème de parler à ses acteurs. Il est traduisible par des indicateurs quantitatifs, dont la relation avec les autres processus écologiques est clairement établie même si elle reste à mieux caractériser – ce serait sans doute l'une des principales priorités de recherche si un programme à long terme devait être mis en place. Contrairement à d'autres indicateurs tout aussi majeurs mais plus difficiles à traduire, comme les indices écologiques fondés sur la diversité fonctionnelle ou phylogénétique, la signification des variations d'indicateurs écoacoustiques peut être directement perçue par un public non scientifique : il suffit d'écouter les pistes sur lesquels ils se fondent. Pour que cela fonctionne, une collaboration entre acousticiens, analystes de données, experts naturalistes locaux et porteurs de politiques publiques est cepen-

-dant essentielle : elle est la condition à un plan d'échantillonnage qui ait du sens, en réponse à des questions adaptées aux spécificités du territoire. L'impact des mesures de conservation en est un, le suivi des dynamiques temporelles écosystémiques et de gradients d'habitats encore mal connus sur le plan écosystémique également. Enfin, l'écoacoustique fait revivre la tradition de l'inventaire naturaliste, fondement de la connaissance écologique d'un territoire. Loin de remplacer l'expert, elle lui propose un outil pour lui permettre d'échantillonner plus longtemps, sur plus de localités, avec toute la puissance permise par les nouvelles méthodes numériques issues de l'intelligence artificielle, de la science des données et des récents développements de la bioacoustique.

NICOLAS MATHEVON, BIOACOUSTICIEN, UNIVERSITÉ DE ST ETIENNE & ECOLE PRATIQUE DES HAUTES ETUDES



Un paysage sonore ne représente que partiellement la diversité des êtres vivants présents dans un environnement, puisque tous ne produisent pas des sons. Mais là où la diversité des espèces d'insectes, de grenouilles, d'oiseaux et de mammifères produisant des sons est grande, la diversité des autres animaux, et même des végétaux, le sera aussi. Considérer les paysages sonores comme témoins des êtres vivants habitant un même environnement est l'une des applications de la bioacoustique. Si notre étude de terrain montre la faisabilité et l'intérêt de cette approche écoacoustique en Polynésie, cette zone géographique présente des caractéristiques exigeantes : conditions de terrain difficiles (fortes humidité et température) demandant un matériel d'enregistrement d'une fiabilité à toute épreuve, relief et densité de végétation rendant difficile l'accès aux zones d'intérêts et imposant la nécessité d'utiliser un matériel à longue autonomie pour limiter le nombre d'interventions, bruit de fond fréquent et variable (rivières à débit aléatoire) rendant délicates les analyses des signaux enregistrés. La faible densité d'animaux sonores est à la fois un inconvénient (les paysages sonores sont-ils ici de bons marqueurs de la biodiversité ?) et un avantage (en augmentant la probabilité de détecter une espèce cible). Si ces points d'attention, loin d'être bloquants, méritent l'attention, l'approche acoustique testée lors de ce projet ouvre la porte à des études plus approfondies, menées sur le long terme, en collaboration avec des naturalistes ayant l'expertise d'une zone géographique fascinante.

RÉFÉRENCES

Barbaro, L., Sourdril, A., Froidevaux, J.S.P., Cauchoix, M., Calatayud, F., Deconchat, M. & Gasc, A. (2022). Linking acoustic diversity to compositional and configurational heterogeneity in mosaic landscapes. Landscape Ecology.

Blanvillain, C., Ghestemme, T., Saavedra, S., Yan, L., Michoud-Schmidt, J., Beaune, D. & O'Brien, M. (2020). Rat and invasive birds control to save the Tahiti monarch (*Pomarea nigra*), a critically endangered island bird. Journal for Nature Conservation, 55, 125820.

Blanvillain, C., Salducci, J.M., Tutururai, G. & Maeura, M. (2003). Impact of introduced birds on the recovery of the Tahiti Flycatcher (*Pomarea nigra*), a critically endangered forest bird of Tahiti. Biological Conservation, 109, 197–205.

Blanvillain, C., Tamaititahio, M., Noguera, C. & Marion, J. (2001). Rat and Introduced Bird Control to Save the Critically Endangered Tahiti Flycatcher (*Pomarea nigra*) from Extinction. Report on the TFC Reproductive Success for the 2001 Breeding Season (Part 1: from 1 July to 31 December 2001; English Report)., Te Manu. Societe d'Ornithologie de Polynesie, Tahiti.

Bradfer-Lawrence, T., Desjonqueres, C., Eldridge, A., Johnston, A. & Metcalf, O. (2023). Using acoustic indices in ecology: Guidance on study design, analyses and interpretation. Methods in Ecology and Evolution, 14, 2192–2204.

Farina, A. (2019). Ecoacoustics: A Quantitative Approach to Investigate the Ecological Role of Environmental Sounds. Mathematics, 7, 21.

Florence, J. (1987). Endémisme et évolution de la flore de la Polynésie Française. Bulletin de la Société Zoologique de France, 112, 369–380.

Gobster, P.H. & Xiang, W.-N. (2012). What do we mean by "landscape"? Landscape and Urban Planning, 106, 219–220.

Krause, B. (2015). Voices of the Wild: Animal Songs, Human Din, and the Call to Save Natural Soundscapes, Illustrated edition. Yale University Press, New Haven London.

Le Bozec, L. (2005). Contribution à l'étude du monarque de Tahiti (*Pomarea nigra*), espèce endémique en voie d'extinction.,.

Metcalf, O., Abrahams, C., Ashington, B., Baker, E., Bradfer-Lawrence, T., Browning, E., Carruthers-Jones, J., Darby, J., Dick, J., Eldridge, A., Elliott, D., Heath, B., Howden-Leach, P., Johnston, A., Lees, A., Meyer, C., Ruiz Arana, U. & Smyth, S. (2023). Good practice guidelines for long-term ecoacoustic monitoring in the UK, The UK Acoustics Network.

Meyer, J.-Y., Fabre Barroso, S., Mazoyer, L., Jordan, M., Fraisse, J., Fourdrignez, M., Taputuarai, R. & Pouteau, R. (2024). Vulnerability and resilience of rainforests to plant invasions in a tropical island of the South Pacific: a sixteen-year survey.

Ostrom, E. (2009). A General Framework for Analyzing Sustainability of Social-Ecological Systems. Science, 325, 419–422.

Pijanowski, L.J.V.-R. and B.C. (2018). soundecology: Soundscape Ecology.

Schafer, R.M. (1977). The Tuning of the World, Random House Inc, New York.

Sueur, J. (2018). Sound Analysis and Synthesis With R, 1st ed. 2018 édition. Springer International Publishing AG, New York, NY.

Sueur, J., Aubin, T. & Simonis, C. (2008). Seewave, a free modular tool for sound analysis and synthesis. Bioacoustics, 18, 213–226.

Thibault, J.-C. & Cibois, A. (2017). Birds of Eastern Polynesia: A biogeographic Atlas, Lynx Nature Books, Barcelona.

Thibault, J.C., Martin, J.L., Penloup, A. & Meyer, J.Y. (2002). Understanding the decline and extinction of monarchs (Aves) in Polynesian Islands. Biological Conservation, 108, 161–174.

Thibault, J.-C. & Meyer, J.-Y. (2001). Contemporary extinctions and population declines of the monarchs (*Pomarea* spp.) in French Polynesia, South Pacific. Oryx, 35, 73–80.

Moorea
Photo : melanie-renaud.com