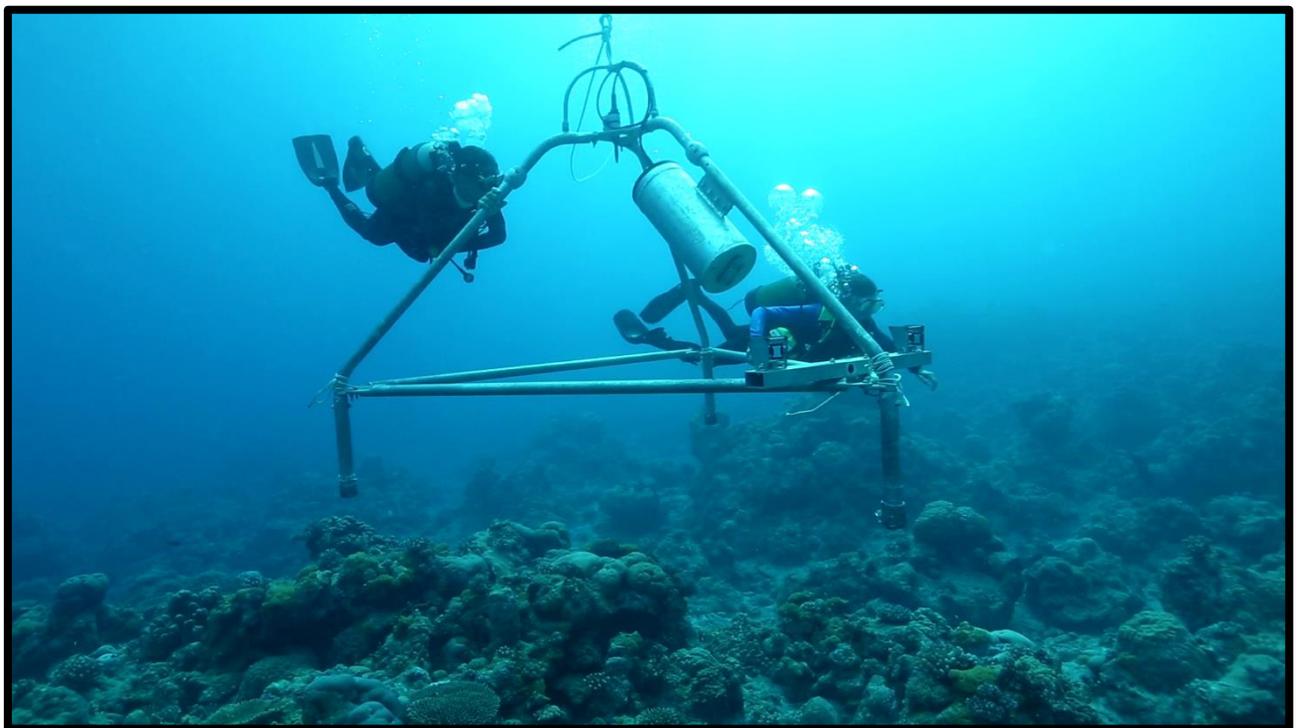




Etat acoustique de référence des récifs coralliens de l'île Europa et premiers résultats du suivi acoustique continu d'avril 2018 à février 2019



Auteurs : Simon Elise & Henrich Bruggemann

Mai 2019



Remerciements

Nous remercions la Commission européenne (DG DEVCO), financeur du projet CORCOPA au travers du programme BEST 2.0 (financement #2266), ainsi que l'IUCN, administrateur de ce financement. Nous remercions également l'Association Nationale Recherche Technologie (ANRT) pour les deux bourses CIFRE attribuées à Simon Elise (#2015/1538) et Isabel Urbina-Barreto (#2017/0322), et l'Ocean Innovation Tour pour son soutien logistique.

Nous remercions chaleureusement les Forces Armées de la Zone Sud de l'Océan Indien (FAZSOI) sans qui ce projet n'aurait pas été possible : l'équipage du B2M Champlain pour le transport et le déchargement à Europa de tout le matériel nécessaire à la mise en place de la station acoustique ; le détachement 89 composé de réservistes de la compagnie Bourbon (2^{ème} RPIMA) pour le creusage de la tranchée permettant le passage du câble dans sa partie terrestre.

Nous tenons également à remercier vivement l'ensemble de l'équipe de terrain (Sophie Bureau, Armand Dayde, Eric Esnault, Vincent Mahamadaly, Erwan Meyer, Franco Nirvola, Isabel Urbina-Barreto) ainsi que l'équipage de l'Antsiva (Anne et Nicolas Tisé, Jonathan Monteil, Odilon Tsiafara) pour la qualité du travail qu'ils ont fourni. Merci aussi à Laurent Vigliola et Jessica Meeuwig pour le prêt des stereo-caméras et du logiciel d'analyse des vidéos, ainsi qu'à Romain Pinel (Geolab) pour sa contribution à l'élaboration des modèles 3D.

Enfin, merci à l'ensemble des personnels TAAF avec qui nous avons interagi à différentes étapes du projet. Nous remercions particulièrement Joanna Kolasinski, Sophie Marinesque, Alexis Cuvillier, et David Ringler du service de la préservation et de la valorisation des Îles Eparses, pour la gestion du projet depuis ses débuts, la délivrance des permis, la coordination logistique ...

Merci également à Jonathan Grand pour le suivi de l'expédition du fret. Merci et bravo aux différents agents TAAF présents sur le terrain à Europa, qui ont contribué au creusage puis rebouchage de la tranchée, et ont su s'approprier la maintenance de la station, la réalisation de petites réparations et la collecte des données : Maxime Amy, Martin Cagnato, Nicolas Guillerault et Thibaut Vergoz.

Ce document a été réalisé avec l'aide financière de l'Union européenne. Le contenu de ce document est la seule responsabilité de l'Université de La Réunion, UMR 9220 UR CNRS IRD ENTROPIE, et ne peut en aucun cas être considéré comme reflétant la position de l'Union européenne.

Ce rapport doit être cité comme suit : S. Elise & H. Bruggemann (2019) Etat acoustique de référence des récifs coralliens de l'île Europa et premiers résultats du suivi acoustique continu d'avril 2018 à février 2019. Université de La Réunion - NortekMed

Sommaire

Introduction	5
<u>Partie 1 : Liens entre caractéristiques des peuplements récifaux d'Europa et indices acoustiques ; état acoustique de référence</u>	8
P1.1. Objectifs spécifiques	8
P1.2. Matériel & méthodes	9
P1.2.1. Sites d'étude.....	9
P1.2.2. Evaluation des fonctions écosystémiques clé	10
P1.2.3. Evaluation des paysages sonores récifaux	11
P1.2.4. Analyses statistiques	13
P1.3. Résultats	13
P1.3.1. Variabilité des paysages benthiques.....	13
P1.3.2. Variabilité des assemblages de poissons	14
P1.3.3. Les trois grands types d'habitat de pente externe	16
P1.3.4. Variabilité des paysages sonores associés	17
P1.3.5. Corrélations entre indices acoustiques et fonctions écosystémiques clé	19
P1.4. Discussion	21
P1.4.1. Méthodes d'évaluation visuelle des communautés benthiques et des assemblages de poissons.....	21
P1.4.2. Interprétation des indices écoacoustiques mis en évidence	21
P1.4.3. Etat acoustique de référence et implication pour les suivis temporels	22
<u>Partie 2 : Suivi acoustique continu, premiers résultats d'avril 2018 à février 2019</u>	24
P2.1. Objectifs détaillés	24
P2.2. Matériel et méthodes	25
P2.2.1. Site d'implantation	25
P2.2.2. Dispositif d'enregistrement et collecte des données	25
P2.2.3. Variabilité temporelle des indices écoacoustiques « fonctionnels ».....	25

P2.2.4 Détection automatique de signaux d'intérêts	26
P2.3. Résultats	27
P2.3.1. Variabilité circadienne.....	27
P2.3.2. Variabilité lunaire	28
P2.3.3. Variabilité saisonnière.....	28
P2.3.4. Détection automatique	30
P2.4. Discussion	31
P2.4.1. Interprétation écologique des variations des indices écoacoustiques et état de référence « temporel »	31
P2.4.2. Vers un outil opérationnel	33
<u>Partie 3 : Mise en œuvre du suivi acoustique pour la gestion</u>	35
P3.1. Mise en œuvre possible dès à présent	35
P3.2. Mise en œuvre possible d'ici la fin 2019	36
P3.3. Mise en œuvre possible en 2020	36
<u>Conclusions</u>	38
<u>Références</u>	39
ANNEXES	43
Annexe 1. Espèces représentant les trois fonctions « poisson » considérées dans cette étude ...	44
Annexe 2. Calcul des indices écoacoustiques	46
Annexe 3. Descripteurs globaux des assemblages de poissons sur les neuf sites évalués	48
Annexe 4. Spectrogrammes sur les bandes de fréquences 0-10 kHz et 0-2 kHz sur chacun des neuf sites	49
Annexe 5. Valeur et significativité des corrélations entre les 30 indices acoustiques et les 12 fonctions écosystémiques clé	52
Annexe 6. Spectrogrammes d'échantillons de 5 min	53
Annexe 7. Variabilité des 6 indices écoacoustiques entre le 29 avril 2018 et le 4 février 2019. Les indices ont été calculés sur la donnée brute non nettoyée.....	55

Introduction

Importance des récifs coralliens de l'île Europa et suivi temporel

Les récifs coralliens isolés tels que ceux d'Europa présentent des caractéristiques écologiques uniques, sans équivalent dans les zones plus anthropisées (D'agata *et al.*, 2016). Les quelques pourcents de récifs coralliens mondiaux aussi peu impactés constituent ainsi des refuges de biodiversité (D'agata *et al.*, 2016; Maire *et al.*, 2016). Europa cumule quatre des cinq facteurs clé pour le succès des aires marines protégées (Edgar *et al.*, 2014) : réserve intégrale, protection efficace, ancienneté, et isolement par des eaux profondes.

Plus de 50% des récifs coralliens pourraient disparaître d'ici à 2050 (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2018). Outre l'enjeu de conserver le patrimoine unique que représentent les récifs d'Europa, ils pourraient permettre le réensemencement des récifs impactés dans la région (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2018). De plus, la vitalité des récifs coralliens conditionne leur complexité structurale, et donc la protection des littoraux contre l'action des vagues (Harris *et al.*, 2018). Au vu de l'augmentation prévisible du niveau des océans, la conservation des récifs coralliens d'Europa pourrait aussi déterminer celle des écosystèmes terrestres de l'île.

Suite à l'évaluation écologique d'un premier site récifal en 2002, les programmes BioRecie (2011), Sireme (2016), et l'OP Eparses (2019) ont permis d'étendre le nombre de sites et la fréquence des suivis. Néanmoins, les fréquences et intensités croissantes des perturbations liées au réchauffement global (blanchissements coralliens, cyclones, etc.) laissent penser que de tels pas de suivis sont insuffisants pour assurer une détection rapide des perturbations (ex : blanchissements en 2016, 2017, puis 2019), qui constitue pourtant un élément clé pour enrayer les mécanismes de déclin (ex : Groner *et al.*, 2016).

Bien que l'« ingénierie écologique » soit encore peu répandue dans les écosystèmes récifaux, des pays comme l'Australie testent de nombreuses pistes d'action directe pour assurer le maintien des grandes fonctions au sein des récifs coralliens (Hughes *et al.*, 2017). Au-delà du bouturage de coraux ou de la réintroduction d'espèces pour renforcer des stocks mis à mal, les interventions peuvent prendre des formes variées telles que la stimulation de la croissance corallienne par courant électrique faible, le pompage d'eau profonde pour refroidir les zones superficielles durant des événements de stress thermique ou encore la détection automatique et l'élimination d'espèces envahissantes (voir par exemple Rau *et al.*, 2012; Anthony *et al.*, 2017; Hoegh-Guldberg *et al.*, 2018). Ces exemples illustrent que des solutions existent en réponse à divers types de perturbations. Ainsi, la détection rapide des perturbations est une étape fondamentale à la gestion efficace des écosystèmes.

L'acoustique passive

Le suivi de l'état écologique des récifs par acoustique passive (Passive Acoustic Monitoring – PAM) consiste à enregistrer en continu, ou à des pas de temps défini, le son ambiant d'un écosystème, aussi appelé « paysage sonore ». Ce dernier comporte trois composantes majeures : la biophonie, la géophonie, et l'anthrophonie (Pijanowski *et al.*, 2011a). En milieu marin, la géophonie est constituée par exemple par le bruit des vagues, ou par celui du vent et de la pluie à la surface de l'eau, et l'anthrophonie regroupe les sons liés au passage de bateaux, à la présence de plongeurs, etc. Quant à la biophonie, elle est constituée dans les récifs coralliens par une myriade de sons émis, de façon volontaire ou non, par les individus des multiples espèces

présentes sur un récif. Ces sons peuvent correspondre à des activités de nutrition, parade nuptial, reproduction, défense, fuite, etc.

L'acoustique passive permet de capter ces activités, sans interférer avec le comportement des individus, en déployant des protocoles standardisés pouvant être mis en œuvre par du personnel peu qualifié. Elle permet ainsi de réduire considérablement les coûts humains et évite les biais d'échantillonnage dus à la présence d'experts sur le terrain. De plus, les données brutes (fichiers de sons) peuvent être archivées, échangées, comparées et ré-analysées ultérieurement. En comparaison, les données issues d'un comptage visuel (ex : GCRMN) sont dépendantes de l'observateur, posant souvent des problèmes de comparaison des données lorsqu'elles ont été collectées par différents observateurs. Ainsi, l'acoustique passive est en train de s'affirmer comme une alternative sérieuse aux méthodes traditionnelles, lesquelles ne permettent pas de répondre aux besoins urgents de suivis à larges échelles spatiales et temporelles (ex : Gibb *et al.*, 2019).

Nous pouvons distinguer deux grandes approches en acoustique passive. La première consiste à cataloguer les sons correspondant à une espèce puis à chercher à les détecter de façon automatique (ex : Tricas & Boyle, 2014; Ibrahim *et al.*, 2018) ; elle est adaptée à des suivis mono-spécifiques (ex : espèce d'intérêt patrimonial). La deuxième approche vise plutôt une évaluation écologique globale de l'écosystème, à travers le calcul d'indices écoacoustiques, et est particulièrement adaptée aux écosystèmes hautement diversifiés tels que les récifs coralliens (Gibb *et al.*, 2019).

Un panel d'indices écoacoustiques a été développé afin d'évaluer les caractéristiques écologiques globales d'un écosystème au travers de son paysage sonore (ex : Sueur *et al.*, 2014). Des relations avec la richesse spécifique, phylogénétique ou encore l'état écologique global de l'écosystème ont ainsi été mises en évidence (voir Gasc *et al.*, 2017 pour des exemples terrestres; Lindseth & Lobel, 2018 pour des exemples marins).

Objectif et genèse du projet CORCOPA

Dans ce contexte, l'objectif principal du projet CORCOPA était d'installer une station autonome de suivi acoustique continu sur le récif corallien de l'île Europa, et de former les agents des Terres Australes et Antarctiques Françaises (TAAF) à son utilisation pour détecter d'éventuelles perturbations écologiques à l'avenir, dans le but de renforcer les capacités des TAAF à gérer ces écosystèmes marins.

Trois objectifs secondaires ont étayé le projet :

1. Etablir des liens entre l'état des peuplements récifaux d'Europa et des indicateurs acoustiques, et définir un état acoustique de référence ;
2. Suivre en continu (24h/24h) le paysage sonore autour d'une station pilote et autonome durant plusieurs années et interpréter en termes écologiques les variations détectées ;
3. Contribuer au plan de gestion de l'île d'Europa grâce aux connaissances acquises par le suivi acoustique.

La collaboration entre l'UMR ENTROPIE (Université de La Réunion) et la société NortekMed, à travers l'encadrement de la thèse de doctorat de Simon Elise, a servi de tremplin à ce projet.

D'une part, le sujet de la thèse porte sur l'utilisation de l'acoustique passive comme outil d'évaluation et de suivi écologique des récifs coralliens, dans l'optique d'optimiser les pratiques de gestion. D'autre part, NortekMed réalise depuis plusieurs années des suivis acoustiques en continu du chantier de la Nouvelle Route du Littoral à La Réunion. Cette rencontre entre intérêts et compétences a permis à ce projet de prendre corps.

La première partie de ce rapport vise à explorer la variabilité des paysages sonores autour de l'île Europa, et à comprendre leurs liens avec les fonctions écosystémiques clé au travers d'indices écoacoustiques. Un état acoustique de référence est ainsi établi.

La deuxième partie de ce rapport utilise les indices écoacoustiques mis en évidence pour réaliser une première exploration de la variabilité du paysage sonore autour de la station autonome de suivi acoustique à plusieurs échelles temporelles.

La troisième partie de ce rapport synthétise les résultats susceptibles d'améliorer le plan de conservation des récifs coralliens d'Europa.

Partie 1 : Liens entre caractéristiques des peuplements récifaux d'Europa et indices acoustiques ; état acoustique de référence

P1.1. Objectifs spécifiques

Les fonctions écosystémiques supportent les principaux services rendus par les écosystèmes aux populations humaines (ex : protection littorale, production de biomasse, ...). Ainsi, au-delà de la préservation de la biodiversité, les stratégies de conservation devraient intégrer le maintien de ces fonctions pour garantir celui des services écosystémiques (Hughes *et al.*, 2017; Bellwood *et al.*, 2019).

Dans les récifs coralliens, de précédentes études écoacoustiques ont mis en évidence des liens entre le paysage sonore et la diversité et l'abondance en poissons (Kennedy *et al.*, 2010; Kaplan *et al.*, 2015; Bertucci *et al.*, 2016; Staaterman *et al.*, 2017). Cependant, l'évaluation des assemblages de poissons uniquement en termes de diversité et d'abondance est réducteur. En effet, la biomasse et les traits d'histoire de vie (intimement liés aux fonctions des organismes dans les écosystèmes) sont reconnus comme des descripteurs plus précis de l'état et du fonctionnement des récifs coralliens (ex : MacNeil *et al.*, 2015).

De la même façon, ces études ont identifié plusieurs indices acoustiques liés au recouvrement total en corail vivant (Kennedy *et al.*, 2010 ; Kaplan *et al.*, 2015 ; Bertucci *et al.*, 2016). Bien que largement utilisée à travers le monde par les programmes de suivi des récifs coralliens (GCRMN, AGRRA, Reef Check, ...), cette mesure synthétique, sans distinction a minima des formes de croissance, peut conduire à une simplification trop importante du fonctionnement de l'écosystème (Darling *et al.* 2012 ; González-Barrios & Álvarez-Filip, 2018). En effet, la diversité des formes de croissance influence fortement les communautés associées (ex : poissons) en leur procurant une diversité de refuges et de sources alimentaires (Pratchett *et al.*, 2008 ; Wilson *et al.*, 2008).

Parmi les huit grandes fonctions écosystémiques essentielles à la dynamique des écosystèmes coralliens identifiées par Harborne *et al.* (2016), nous en avons évalué six en utilisant des méthodes basées sur l'imagerie :

- La complexité de l'habitat. Elle supporte de nombreux processus écologique et est essentielle à la protection littorale (Graham & Nash, 2013; Harris *et al.*, 2018) ;
- Le recouvrement en coraux encroûtant. Une faible diversité d'organismes y est généralement associées (Gratwicke & Speight, 2005 ; Wilson *et al.*, 2008) ;
- Le recouvrement en coraux de formes plus complexes (par exemple : laminaires, foliacées et en forme de casque). Ils favorisent la diversité et l'abondance d'autres organismes récifaux (Gratwicke & Speight, 2005 ; Wilson *et al.*, 2008) ;
- La biomasse en herbivores. Ils jouent un rôle fondamental dans la régulation de l'équilibre algo-corallien, la bioérosion externe, la prédation du corail, ... (Bellwood *et al.*, 2012) ;
- La biomasse en planctonophages. Ils permettent l'intégration d'une source importante de nutriments, le plancton, dans les chaînes alimentaires récifales (Hamner *et al.*, 2007) ;
- L'abondance en consommateurs tertiaires. Ils régulent les chaînes alimentaires et contribuent à leur stabilité (Bascompte *et al.*, 2005).

Nous avons ensuite recherché des liens entre une palette d'indices acoustiques et ces grandes fonctions écosystémiques.

L'objectif de cette première partie du projet CORCOPA est double :

- 1- mieux comprendre les liens entre paysages sonores et fonctionnement de l'écosystème, en affinant les indices écoacoustiques mis en évidence jusqu'alors
- 2- sélectionner des indices écoacoustiques dont le suivi temporel pourrait permettre de détecter des variations de fonctionnement de l'écosystème, et ainsi contribuer aux besoins de gestion actuels.

P1.2. Matériel & méthodes

P1.2.1. Sites d'étude

Nous avons échantillonné neuf sites, entre 10 et 15m de profondeur, afin de refléter la diversité des habitats de pente externe autour d'Europa, et trouver les contrastes nécessaires à la mise en évidence de différences fonctionnelles (Figure 1) :

- EU1, EU2, EU3 : sites exposés à pente faible et haut recouvrement en substrat vivant (> 50%)
- EU7, EU8, EU9 : sites à forte pente et haut recouvrement en substrat vivant (> 50%)
- EU10, EU11, EU12 : sites exposés à pente faible et recouvrement en substrat vivant moins important (< 45%)

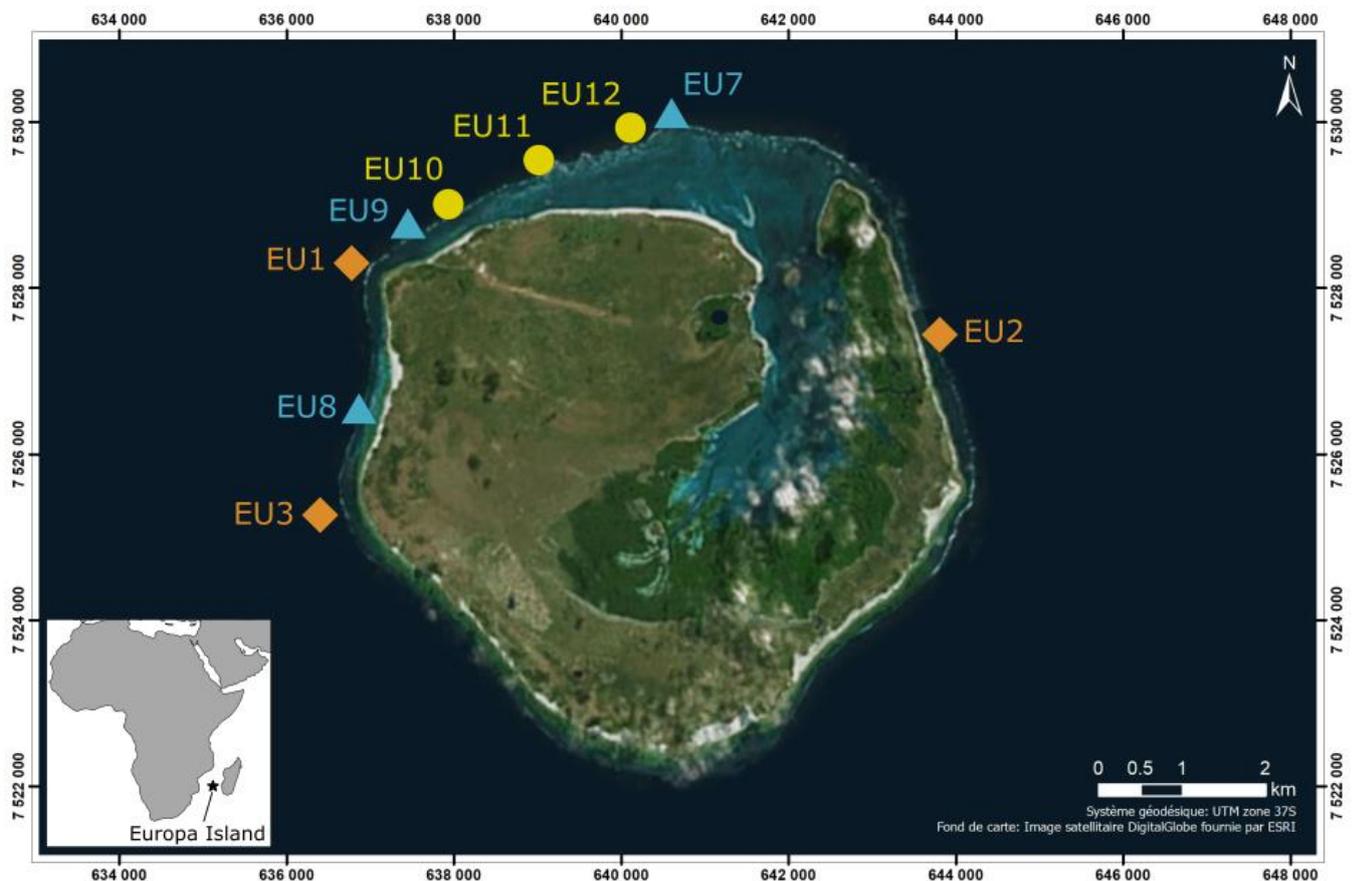


Figure 1. Localisation des 9 sites d'étude autour de l'île Europa

P1.2.2. Evaluation des fonctions écosystémiques clé

Les fonctions assurées par l'habitat

Un modèle 3D de 150m² (15 x 10 m) d'habitat benthique a été reconstruit pour chaque site par photogrammétrie sous-marine à l'aide d'un protocole standardisé mis au point par une partie de l'équipe (Isabel Urbina-Barreto, Romain Pinel, Vincent Mahamadaly – GEOLAB – CREOCEAN OI). Le nombre de photographies prises par site pour reconstruire les modèles ont varié entre 500 et 1300, en fonction de la complexité du site.

Des orthomosaïques (image 2D, géométriquement corrigée, du site) et modèles digitaux de surface (DSM ; représentation de l'élévation de la surface du terrain) ont été créés à partir des modèles.

La complexité de l'habitat a été calculée comme le ratio de la surface 3D (calculée depuis sur le DSM en utilisant l'outil « Surface Volume » du programme ArcGIS – ESRI, 2018) sur la surface 2D du site (i.e. 150 m²).

Le recouvrement de sept formes de croissance coralliennes (encroûtant, branchu, massif, LFH - laminaire, foliacé, en forme de casque -, colonnaire, tabulaire et polype libre) a été estimée sur les orthomosaïques en utilisant le programme QGIS (QGIS Development Team, 2018). Chaque colonie corallienne a été délimitée et classifiée selon sa forme de croissance, telle que définie par Veron (2000). La surface 2D de chaque colonie, puis les surfaces totales par forme de croissance ont ensuite été calculées.

La forme de croissance est l'un des plus importants traits d'histoire de vie des coraux (Darling *et al.*, 2012) et détermine les fonctions écologiques remplies par les coraux (Bellwood *et al.*, 2019). Ceci implique que l'abondance relative des différentes formes de croissance présentes sur un site occasionne des variations fonctionnelles entre sites (González-Barríos & Álvarez-Filip, 2018).

Pour simplifier, nous nous sommes focalisés sur 2 formes de croissance contrastées bien représentées sur les neuf sites : i) les coraux encroûtants (ENC) et ii) les coraux laminaires, foliacés et en forme de casque (LFH). Leur pourcentage de recouvrement a été calculé sur chaque site.

Les fonctions assurées par les poissons

Des enregistrements vidéos ont été utilisés pour évaluer la diversité, l'abondance et la biomasse des assemblages de poissons sur chaque site (ex : Myers *et al.*, 2016). Des stereo-caméras (deux GoPro) fixées à un support 50 cm au-dessus du substrat ont filmé les assemblages durant 90 min. Les caméras ont été orientées de façon à filmer pour moitié le substrat, pour moitié la colonne d'eau au-dessus. Chaque individu a été identifié et un index d'abondance et de biomasse a été estimé pour chaque espèce à l'aide du programme EventMeasure (SeaGIS, Bacchus Marsh, Australia). L'abondance maximale « MaxN » pour une espèce est le nombre maximal d'individus de cette espèce simultanément présents sur une image de la vidéo. La taille de ces individus a été mesurée et leur biomasse évaluée, pour calculer la biomasse maximale « MaxB » de cette espèce. Le régime alimentaire et la classe de taille, cette dernière étant basée sur la taille maximale connue de l'espèce (FishBase, 2018), ont été compilés pour chaque espèce.

La diversité, l'abondance et la biomasse (logarithme) ont été calculés pour les brouteurs, planctonophages et consommateurs tertiaires. Nous avons désigné par brouteurs les « scrapers/small excavators » et « grazers/detritivores » décrits par Green & Bellwood (2009). Les planctonophages ont été définis selon leur seul régime alimentaire. Les consommateurs

tertiaires ont été définis comme les piscivores et consommateurs d'invertébrés mobiles, dont la taille maximale est > 50 cm. Les espèces correspondantes à ces trois fonctions sont indiquées en annexe 1.

Trois des huit fonctions soulignées par Harborne *et al.* (2016) n'ont pas pu être évaluées : les algues benthiques, le plancton et les invertébrés. En effet, les orthomosaïques générées par photogrammétrie ne sont pas adaptées à l'évaluation de l'abondance algale. Pour des raisons logistiques, nous n'avons pas pu échantillonner le plancton, et notre échantillonnage des invertébrés (voir Elise & Bruggemann, 2018) s'est révélé insuffisant.

Les cinq fonctions restantes ont été représentées par 12 variables : recouvrement en coraux encroûtants, recouvrement en coraux LFH, complexité de l'habitat, et diversité, abondance et biomasse (log) des trois « fonctions poissons ».

P1.2.3. Evaluation des paysages sonores récifaux

Les paysages sonores ont été enregistrés à l'aide d'un hydrophone omnidirectionnel RESON TC 4014-5 fixé au sommet d'un grand tripode en aluminium (à environ 1,5 m au-dessus du substrat) et orienté vers le bas pour limiter l'influence du bruit de surface. L'hydrophone était connecté à une chaîne d'acquisition (pré-amplificateur, carte d'acquisition, et PC), conçue par la société NortekMed S.A.S. et abritée dans un conteneur étanche lui-aussi fixé au tripode (Figure 2). Le tripode a été fixé au récif à l'aide de drisses pour éviter tout mouvement durant les enregistrements. Le système d'enregistrement a été calibré à l'aide d'un pistonphone Brüel & Kjaer 4229, et programmé pour enregistrer de façon continue à un taux d'échantillonnage de 100 kHz et une profondeur de 16 bits, permettant des analyses de 0 à 50 kHz.

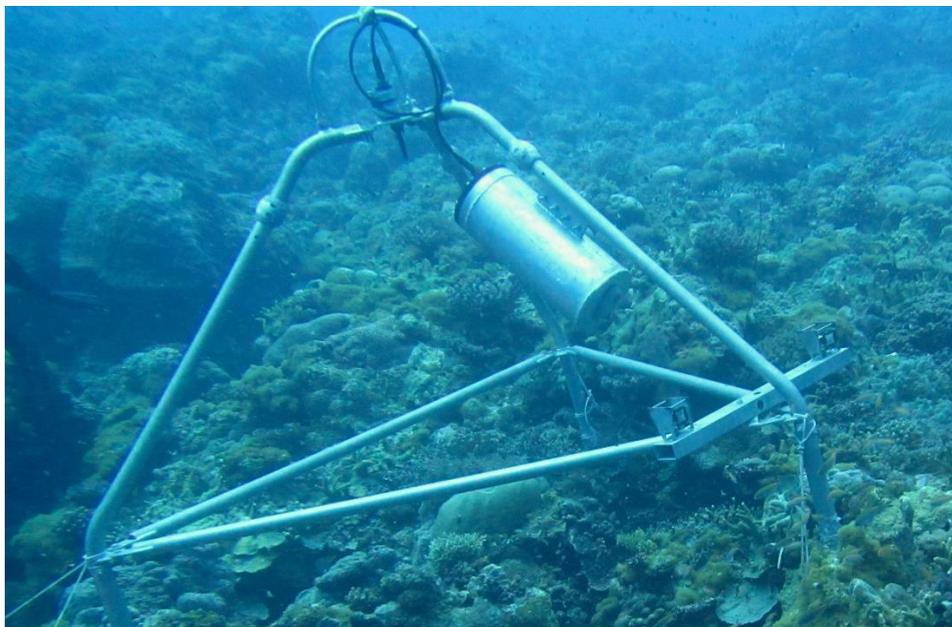


Figure 2. Tripode supportant l'hydrophone, le conteneur étanche, et les 2 GoPros (stéréo-caméras), ici sur le site EU9

Sur chaque site, les paysages sonores ont été enregistrés environ 24h. Pour la recherche de liens avec les fonctions écosystémiques clé, nous nous sommes concentrés sur au moins 2h de son enregistré entre 9h30 et 15h30. En effet l'activité des organismes récifaux (ex : Myers *et al.* 2016) et les paysages sonores (Elise *et al.*, en révision) sont relativement stables durant cette période.

Les enregistrements ont été réalisés sur les mêmes sites que les modèles 3D, simultanément ou proche dans le temps des enregistrements vidéos des assemblages de poissons, sans plongeurs ni bateaux à proximité.

L'enregistrement acoustique continu issu de chaque déploiement a été divisé en échantillons de 5 min, une durée adaptée à l'évaluation des paysages sonores récifaux (Elise *et al.*, en révision). Chaque échantillon acoustique a été inspecté individuellement à l'aide de spectrogrammes, et écouté lorsque nécessaire, afin d'éliminer les échantillons contenant des bruits de vagues, de bateaux, ou d'impacts d'animaux sur l'hydrophone. Grâce à des conditions météo favorables, très peu d'échantillons ont été éliminés. Vingt-quatre échantillons de 5 min (.wav) « propres » ont été conservés pour chaque site.

Pour chaque échantillon de 5 min, nous avons calculé trois indices écoacoustiques communément utilisés dans le domaine marin (SPL, H and ACI) et trois indices moins connus (BI, sh and th) (Tableau 1). Ils décrivent de façon synthétique des caractéristiques globales du paysage sonore en s'intéressant à différentes combinaisons de trois domaines d'analyse : la fréquence (=son grave ou aigu), l'amplitude (=volume sonore), et le temps. Ces six indices ont été calculés sur cinq bandes de fréquence (0,1-0,5 kHz; 0,5-1 kHz; 1-2 kHz; 2-7 kHz; 0-50 kHz) pour lesquelles des liens avec les caractéristiques écologiques majeures des récifs coralliens ont été précédemment identifiés. En effet, de fortes valeurs de SPL/PSD ou d'ACI dans les basses fréquences (<1 kHz) sont liées à des assemblages de poissons diversifiés et abondants, des recouvrements et une diversité corallienne importants, un fort recouvrement en algues coralinacées encroûtantes, une forte complexité structurale ou une forte densité en macro-invertébrés mobiles (Kennedy *et al.*, 2010; Kaplan *et al.*, 2015; Bertucci *et al.*, 2016; Freeman & Freeman, 2016; Staaterman *et al.*, 2017). Des valeurs importantes de ces indices dans les hautes fréquences (>2 kHz) indiquent habituellement des macroalgues abondantes (Freeman & Freeman, 2016) et la présence de crevettes pistolet (Alpheidae; Lillis & Mooney, 2018).

Tableau 1. Liste des indices acoustiques calculés [voir Sueur (2018) pour plus de détails].

Domaine d'analyse du son	Index acoustique	Définition
Fréquences - amplitude	Sound Pressure Level (SPL)	Ratio de la pression locale absolue du son (causée par une onde sonore) sur le niveau de référence (<i>Pref</i> sous-marine= 10^{-6} Pa) sur une échelle logarithmique (en dB), calculé sur une bande de fréquences donnée
	Bioacoustic Index (BI)	Aire de la surface sous la courbe du spectre moyen en dB, entre 2 limites de fréquence
	Spectral entropy (sh)	Régularité de Shannon du spectre de fréquence. sh est convertie en variabilité spectrale (sv) par la relation $sv = 1 - sh$
Temps - amplitude	Temporal entropy (th)	Régularité de Shannon de l'enveloppe d'amplitude. th est convertie en variabilité temporelle (tv) par la relation $tv = 1 - th$
	Acoustic entropy index (H)	Multiplication de sh par th

Fréquences - temps - amplitude	Acoustic Complexity Index (ACI)	Mesure de la complexité de la matrice des transformées de Fourier (Short-time Discrete Fourier Transform), qui donne plus d'importance aux sons modulés en amplitude et, qui réduit ainsi l'importance des sons à amplitude plus constante
-----------------------------------	------------------------------------	--

Nous avons ainsi examiné 30 combinaisons acoustiques différentes (six indices x cinq bandes de fréquences) dans cette étude (voir annexe 2 pour le calcul de ces indices). Les 24 valeurs de chaque indice ont été moyennées afin d'obtenir une seule valeur par site.

De plus, nous avons utilisé trois outils de visualisation (voir Sueur, 2018) pour mieux identifier les principales différences de paysages sonores entre sites :

- L'enveloppe d'amplitude (*Amplitude envelope*) : c'est la représentation la plus proche de la donnée brute puisqu'elle représente la variation de l'énergie sonore dans le temps ;
- Le spectre de fréquences (*Frequency spectrum*) : c'est le résultat visuel de la transformation du domaine temporel vers le domaine fréquentiel réalisé par les transformations de Fourier ;
- Le spectrogramme (*Spectrogram*) : la matrice des coefficients de Fourier est projetée comme une image avec le temps sur l'axe des abscisses, la fréquence sur l'axe des ordonnées et l'amplitude codée par un gradient de couleurs.

P1.2.4. Analyses statistiques

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées sur le programme R (Version 3.5.0, R core Team 2018), avec tous les tests à un niveau de significativité de 0,95. Nous avons d'abord visualisé les différences fonctionnelles entre les neuf sites avec trois Analyses en Composantes Principales réalisées sur les variables représentant les fonctions écosystémiques. Nous avons ensuite examiné les corrélations entre ces 12 variables et les 30 indices acoustiques. Pour chaque fonction écosystémique, nous avons retenu l'indice acoustique le plus corrélé (c'est-à-dire avec le plus haut coefficient de corrélation de Pearson). Nous avons ainsi obtenu six combinaisons fonction – indice acoustique.

De plus amples détails méthodologiques peuvent être trouvés dans le rapport de campagne (Elise & Bruggemann, 2018) et dans l'article en cours de publication (ref).

P1.3. Résultats

P1.3.1. Variabilité des paysages benthiques

Les neuf sites étudiés présentent des communautés benthiques fortement contrastées, avec des recouvrements coralliens (scléactiniaires et millépores) allant de 24 à 67 %, et des compositions en formes de croissance coralliennes très variables (Fig. 3). Les recouvrements en coraux encroûtant sont plus importants sur les sites exposés, ceux en coraux LFH plus importants sur les sites à forte pente. La complexité de l'habitat varie de 1,5 à 3,1 sur ces neuf sites (Fig. 4). Elle est plus importante sur les sites protégés des houles dominantes.

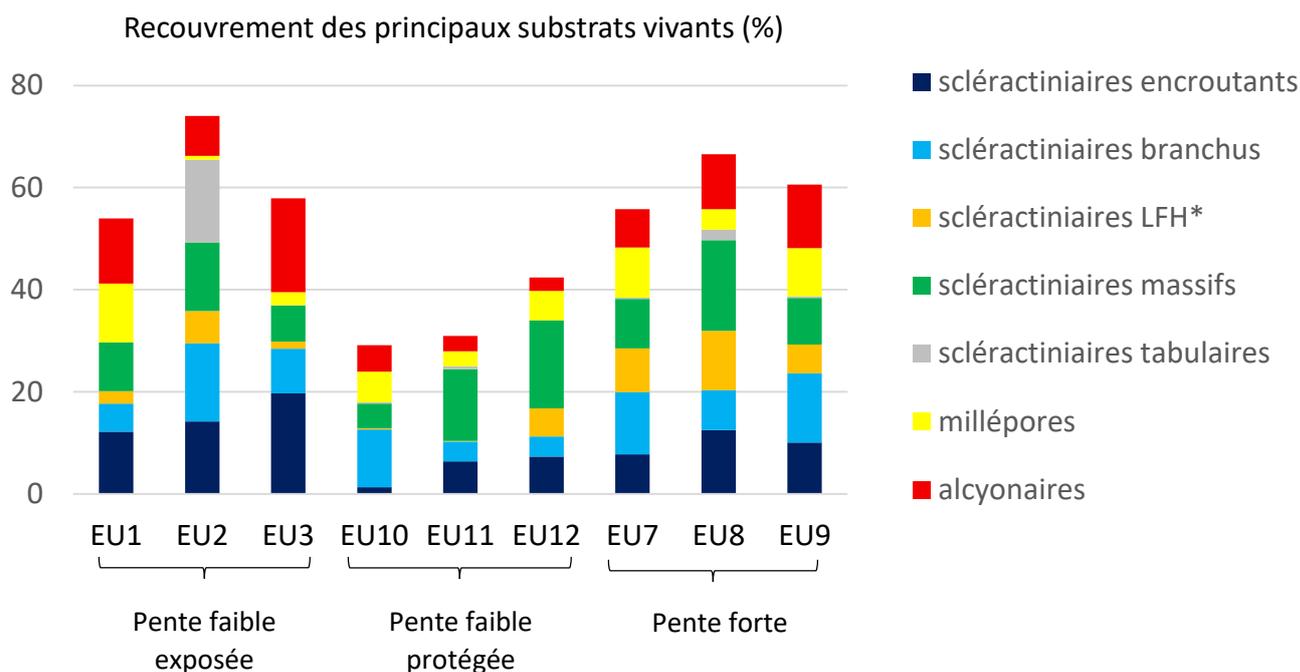


Figure 3. Recouvrements cumulés (en %) des principaux substrats vivants sur chacun des sites d'étude. *LFH = laminaire, foliacé, en forme de casque

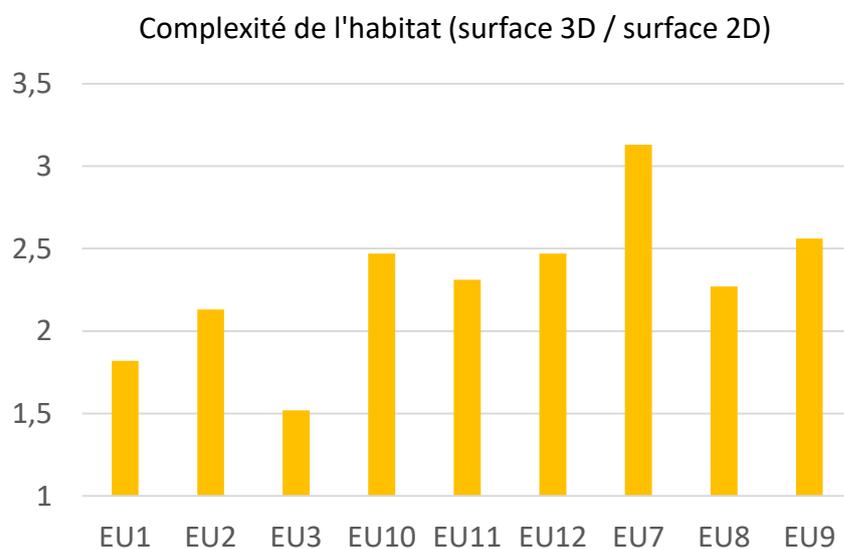


Figure 4. Complexité de l'habitat sur chacun des sites d'étude

P1.3.2. Variabilité des assemblages de poissons

Les analyses vidéo ont permis d'identifier 172 espèces de poissons, dont 12 viennent compléter la liste faunistique établie pour Europa par Fricke *et al.* (2013). En dehors des analyses vidéo, nous avons pu observer les espèces *Plectorhinchus plagiodesmus* (Haemulidae) et *Oxycirrhites typus* (Cirrhitidae), elles-aussi non référencées à l'île Europa.

Les valeurs des descripteurs globaux des assemblages de poissons (diversité, abondance, biomasse) pour chacun des sites sont disponibles en annexe 3.

Les trois descripteurs fonctionnels sur lesquels s'est focalisée notre étude montrent une grande hétérogénéité entre sites, avec globalement des valeurs plus importantes sur les sites à pente forte (EU7, EU8, EU9) (Figs. 5 à 7).

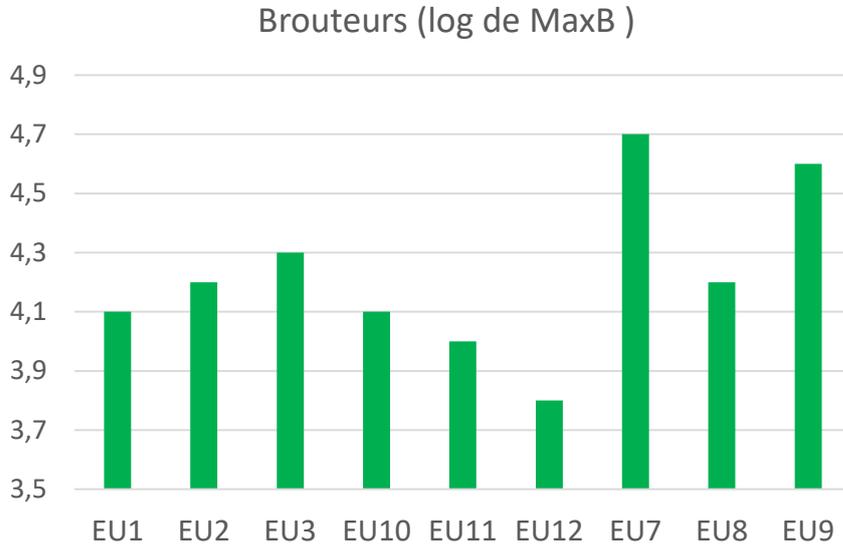


Figure 5. Indice de biomasse en brouteurs (log MaxB) sur chacun des sites d'étude

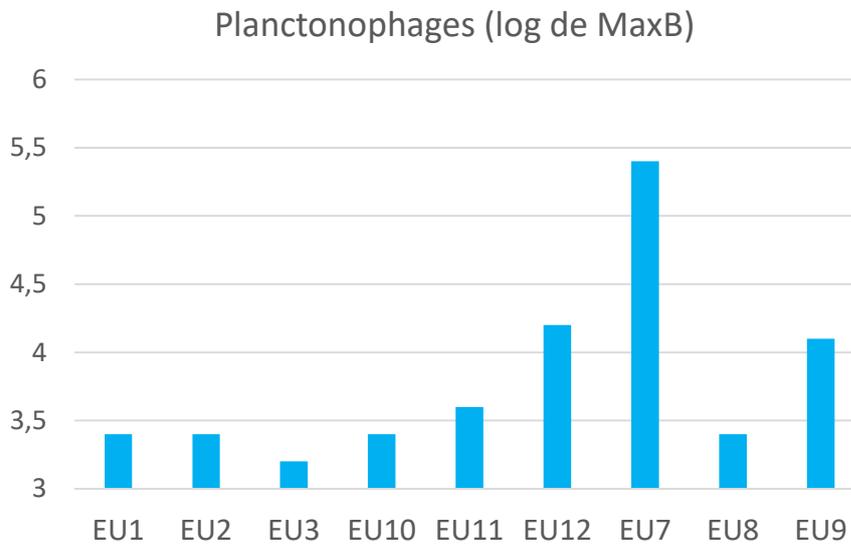


Figure 6. Indice de biomasse en planctonophages (log MaxB) sur chacun des sites d'étude

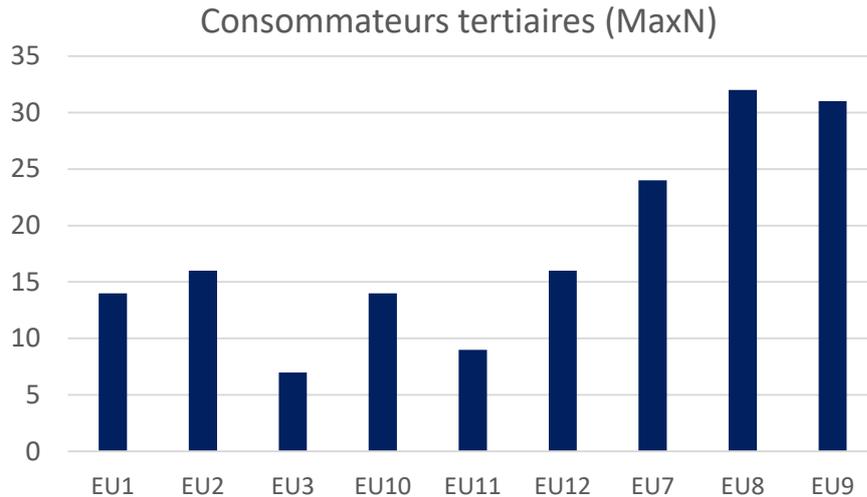


Figure 7. Indice d'abondance en consommateurs tertiaires (MaxN) sur chacun des sites d'étude

P1.3.3. Les trois grands types d'habitat de pente externe

L'évaluation simultanée des six fonctions écosystémiques clé révèle des différences dans le fonctionnement de l'écosystème sur les neuf sites. Les trois grands types d'habitat sont différents, que les fonctions « poisson » soient considérées en termes de diversité, d'abondance ou de biomasse (Fig. 8).

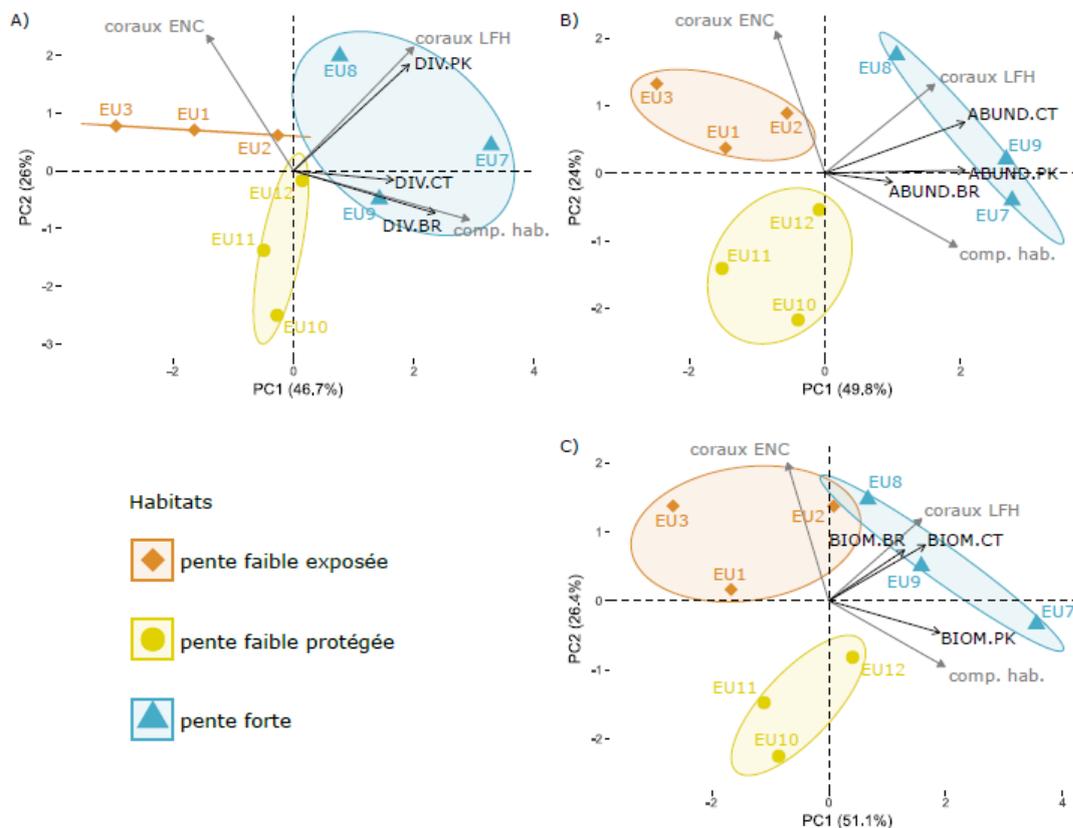


Figure 8. Analyses en composantes principales réalisées sur les six fonctions écosystémiques, les fonctions « poisson » étant considérées : A) en diversité ; B) en abondance ; C) en biomasse. ENC : encroûtant ; LFH : laminaire, foliacé, en forme de casque ; BR : brouteurs ; PK : planctonophages ; CT : consommateurs tertiaires

P1.3.4. Variabilité des paysages sonores associés

Ces variations fonctionnelles s'accompagnent de variations dans les paysages sonores. Pour simplifier, nous présentons ici les caractéristiques acoustiques des deux sites les plus contrastés d'un point de vue fonctionnel : EU3 et EU7. Les spectrogrammes des neuf sites sont disponibles en annexe 4.

L'énergie acoustique globale est plus importante sur le site EU3 (Fig. 9D), mais les spectrogrammes et les spectres de fréquence révèlent que cette énergie est principalement contenue dans les hautes fréquences (>2 kHz) (Fig. 9B). A contrario, EU7 présente plus d'énergie dans les basses fréquences qu'EU3 (0,1-0,5 kHz, et, dans une moindre mesure, 0,5-1 kHz ; Fig. 9C). Les spectres de fréquence (Fig. 9B) révèlent également que l'énergie est plus équilibrée entre basses et hautes fréquences sur EU7 que sur EU3, ce dernier site présentant plus de variabilité spectrale (Fig. 9B). Bien que l'énergie moyenne soit plus importante sur EU3, EU7 présente une plus forte variabilité dans le temps (Fig. 9D). Cette variabilité temporelle est illustrée dans la bande 1-2 kHz : EU3 et EU7 présentent des amplitudes maximales similaires (voisines de 70-75 dB_{rms} re 1μPa) alors que l'amplitude minimale est voisine de 60 dB_{rms} re 1μPa sur EU3, et 50 dB_{rms} re 1μPa sur EU7 (Fig. 9C).

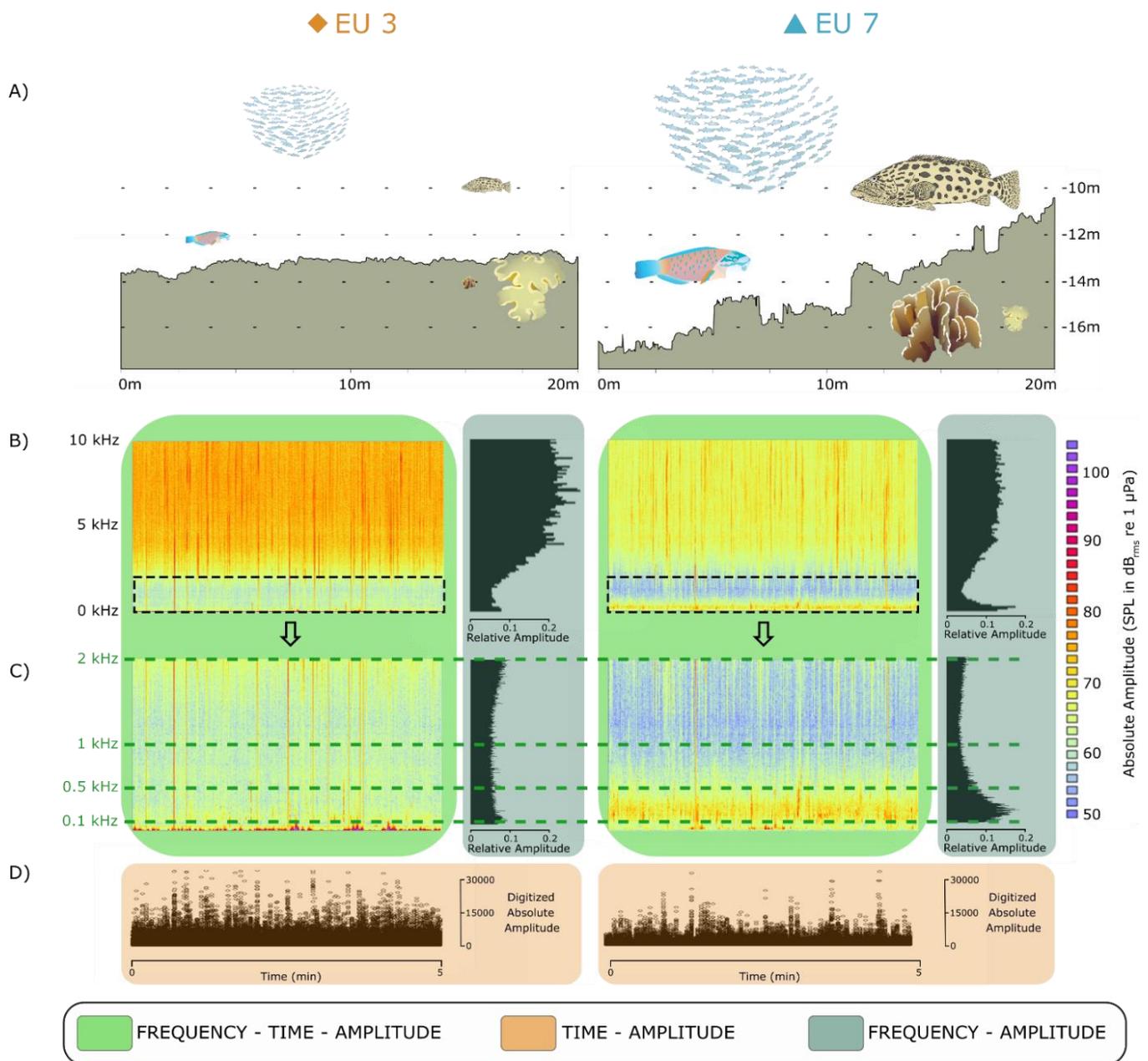


Figure 9. Fonctions écosystémiques clé et paysages sonores associés sur deux sites contrastés (EU3 et EU7). A) Illustrations de la complexité de l'habitat et des cinq autres fonctions clé. La taille des icônes est proportionnelle à la valeur de la fonction représentée : log (biomasse) des planctonophages, log(biomasse) des brouteurs, abondance des consommateurs tertiaires, recouvrement en coraux LFH, recouvrement en coraux ENC ; B) Spectrogramme et spectre de fréquence correspondant sur la bande de fréquences 0-10 kHz ; C) Spectrogramme et spectre de fréquence correspondant sur la bande de fréquences 0-2 kHz ; D) Enveloppe de l'amplitude. Crédit icônes: Joanna Woerner, Dieter Tracey, Kim Kraeer, Lucy Van Essen-Fishman, et Tracey Saxby (Integration and Application Network of the University of Maryland Center for Environmental Science, <http://ian.umces.edu/imagelibrary/>)

P1.3.5. Corrélations entre indices acoustiques et fonctions écosystémiques clé

Plusieurs indices acoustiques capables de détecter ces contrastes ont été mis en évidence. Les coefficients de corrélation les plus hauts entre indices acoustiques et fonctions écosystémiques ont été obtenus pour des indices acoustiques combinant les trois domaines d'analyse du son, sur plusieurs bandes de fréquences (Fig. 10 et annexe 5) :

- *Fréquences – amplitude* : SPL 0,1-0,5 kHz ; bioacoustic index 0,5-1 kHz ; bioacoustic index 1-2 kHz ; variabilité spectrale 0-50 kHz
- *Temps – amplitude* : variabilité temporelle 0-50 kHz
- *Fréquences – temps – amplitude* : ACI 1-2 kHz

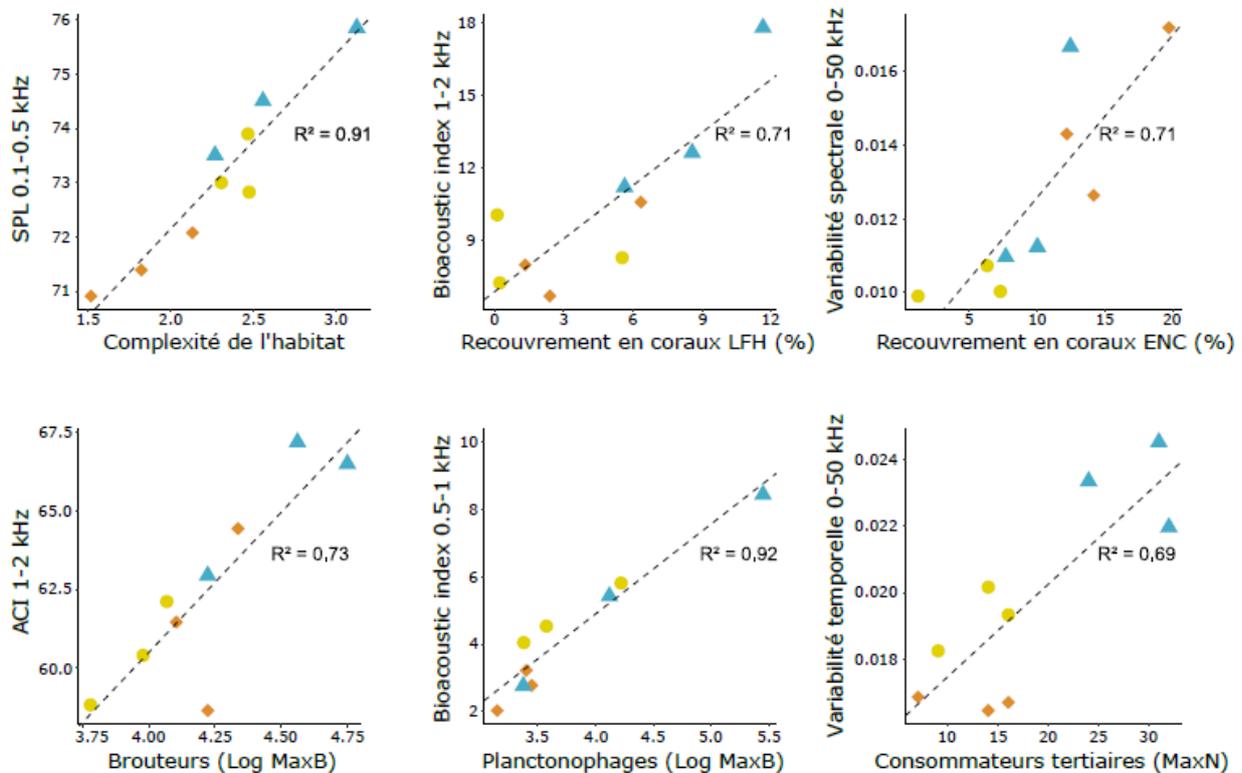


Figure 10. Corrélations entre indices acoustiques et fonctions écosystémiques. Les valeurs de SPL sont en dB_{rms} re $1\mu\text{Pa}$, les autres indices sont sans unité. Les symboles et codes couleur font référence aux trois types d'habitat

Les variabilités spectrale et temporelle sur la bande 0-50 kHz sont significativement différentes entre les trois types d'habitat (Fig. 11). Les valeurs de bioacoustic index 1-2 kHz, et d'ACI 1-2 kHz sont similaires entre les sites à pente faible, qu'ils soient exposés ou protégés (Fig. 11), alors que les valeurs de SPL 0.1-0.5 kHz, et de bioacoustic index 0.5-1 kHz diffèrent significativement entre ces deux types d'habitat (Fig. 11).

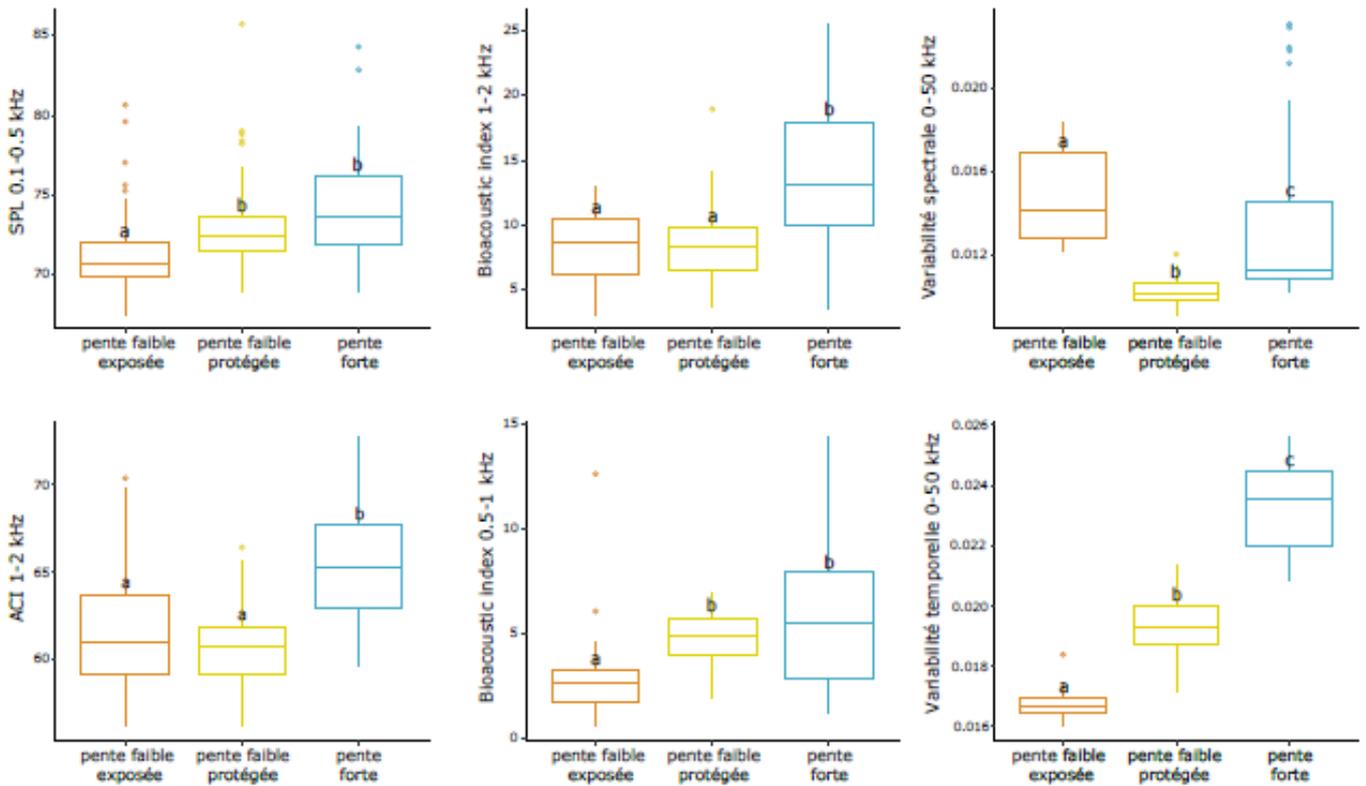


Figure 11. Boxplots des valeurs des six indices écoacoustiques dans les trois types d'habitat (n=72 pour chaque type d'habitat). L'effet du type d'habitat a été testé avec des tests de Kruskal-Wallis et post-hoc correspondants, les pré-requis aux tests paramétriques n'étant pas remplis. Les différences significatives ($p < 0,001$) entre types d'habitat sont indiquées par des lettres différentes.

P1.4. Discussion

P1.4.1. Méthodes d'évaluation visuelle des communautés benthiques et des assemblages de poissons

Parmi les neuf sites, EU1, EU2, EU3, et EU7 ont été échantillonnés en 2011 (Chabanet *et al.*, 2016). Il existe des différences notables entre les estimations de recouvrements benthiques produites par les deux études. Elles pourraient être expliquées par des changements dans la structure des communautés entre 2011 et 2018, mais proviennent plus probablement des différentes méthodologies utilisées pour évaluer les paysages récifaux (Line Intercept Transect le long de trois réplicats de 20m dans Chabanet *et al.*, 2016).

Les diversités en poissons relevées par les deux méthodes sont en revanche plus cohérentes. Bien que fixe, un comptage vidéo détecte en moyenne 9,5 espèces de plus qu'un comptage visuel le long d'un transect de 50 m. Cette différence pourrait être liée à la présence des plongeurs (Emslie *et al.*, 2018). Cependant, ces deux types de comptages semblent complémentaires : certaines familles sont mieux détectées visuellement *in situ* (ex : Pomacentridae, gobiidae, blennidae) alors que la diversité d'autres familles (ex : Labridae, incluant les Scaridae) pourrait être mieux appréhendée à travers les comptages vidéo. En effet 9 espèces de Labridae non recensées dans l'étude de Fricke *et al.* (2013) ont été identifiées par cette méthode.

P1.4.2. Interprétation des indices écoacoustiques mis en évidence

Cette étude, comme celle de Freeman & Freeman (2016), a montré une forte corrélation entre le SPL 0,1-0,5 kHz et la complexité de l'habitat. Ces auteurs expliquent qu'un habitat plus complexe abrite une diversité d'organismes plus importante (ex : poissons), dont l'activité produit des sons dans les basses fréquences (Tricas & Boyle, 2014). Nous sommes en accord avec cette hypothèse. Cependant, la propagation des sons dépendant de l'arrangement des surfaces réfléchissantes et absorbantes de l'environnement (Pijanowski *et al.*, 2011b), nous suggérons que des structures sous-marines complexes pourraient également favoriser la réflexion des sons graves produits sur site ou venant des alentours, augmentant ainsi le volume sonore dans les basses fréquences.

De précédentes études ont trouvé des corrélations entre indices écoacoustiques et recouvrement corallien global (Kennedy *et al.*, 2010 ; Kaplan *et al.*, 2015 ; Bertucci *et al.*, 2016). Nos résultats montrent que les recouvrements en différentes formes de croissance coralliennes sont liés à divers aspects des paysages sonores.

D'une part, le recouvrement en corail LFH est corrélé au bioacoustic index 1-2 kHz. Des sons d'invertébrés (Radford *et al.*, 2008; Freeman & Freeman, 2016), mais aussi de poissons (ex : Lobel *et al.*, 2010; Tricas & Boyle, 2014) ont été associés à cette bande de fréquence. Le bioacoustic index considérant à la fois le volume sonore et le nombre de bandes de fréquences utilisées (Boelman *et al.*, 2007), son niveau dans la bande 1-2 kHz pourrait refléter la diversité et l'abondance des organismes qui trouvent refuge dans l'habitat offert par les coraux LFH. D'autre part, le recouvrement en coraux encroûtant est corrélé à la variabilité spectrale 0-50 kHz, qui reflète la variabilité de l'amplitude du son selon les bandes de fréquences. Des sites à fort recouvrement en coraux encroûtants, tels que EU3, montrent des différences marquées entre l'amplitude du son dans les hautes et basses fréquences, induisant une forte variabilité spectrale.

Cette variabilité pourrait refléter la vacance de nombreuses niches acoustiques, les sites à fort recouvrement encroûtant étant moins attractifs pour une diversité d'organismes récifaux (ex : Wilson *et al.*, 2008). Nous suggérons que le bioacoustic index 1-2 kHz et la variabilité spectrale 0-50 kHz représentent des proxys pour l'évaluation de différentes fonctions assurées par les coraux.

Les poissons de grande taille sont extrêmement vulnérables aux impacts anthropiques directs et changements climatiques (ex: Mellin *et al.*, 2016), tout en étant importants dans le fonctionnement des récifs coralliens (Bascompte *et al.*, 2005). La capacité à détecter de fortes biomasses, et donc probablement des poissons de grande taille, pourrait être une contribution importante de l'écoacoustique.

Parmi les brouteurs, les poissons perroquets (i.e. *Scarus* spp and *Chlorurus* spp) sont particulièrement bruyant quand ils se nourrissent en raclant leurs dents sur les substrats durs, produisant alors des sons sur une large bande de fréquence, de quelques dizaines de Hz à 9 kHz approximativement (Lobel *et al.*, 2010, Tricas & Boyle, 2014). Cependant, nous avons trouvé une corrélation entre la biomasse de brouteurs et l'ACI calculé sur la bande de fréquence 1-2 kHz, bien plus étroite. Il est probable que les sons produits par les brouteurs soient « noyés » dans le son ambiant entre 0 et 1 kHz (activité d'autres poissons ; Lobel *et al.*, 2010 ; Tricas & Boyle, 2014) et au-dessus de 2 kHz (activité des crevettes pistolet ; Lillis & Mooney, 2018). L'ACI a été développé pour détecter des sons éphémères, rapidement modulés et hautement énergétiques, en contraste avec le bruit de fond (Pieretti *et al.*, 2011). Cet indice pourrait ainsi être bien adapté à la détection d'évènements de broutages, qui ressortent du bruit de fond et qu'on peut entendre sous l'eau.

Qu'ils soient sédentaires (*Chromis* - Pomacentridae -, *Pseudanthias* – Serranidae -) ou mobiles (certains Acanthuridae, Caesionidae, et Balistidae), presque tous les planctonophages forment de grands bancs. La présence de ces derniers sur un site précis est extrêmement variable et influence probablement le paysage sonore associé. Tricas & Boyle (2014) ont enregistré l'activité *in situ* de bancs de *Pseudanthias bicolor*, avec une fréquence maximale de 793 Hz. Durant l'analyse des enregistrements vidéos, nous avons observé de nombreux mouvements rapides de grands bancs de planctonophages, particulièrement quand ils sont chassés par les prédateurs. Ces évènements sont associés à des sons caractérisés par des pics de fréquence hautement énergétique entre 0,5 et 1 kHz, ce qui pourrait expliquer la corrélation trouvée dans la présente étude.

Enfin, nous avons montré une corrélation entre l'abondance des consommateurs tertiaires et la variabilité temporelle sur la bande 0-50 kHz. Nous suggérons que les consommateurs tertiaires ciblent préférentiellement les sites sur lesquels de nombreux évènements acoustiques ont lieu, traduisant l'activité d'une diversité et/ou d'une abondance de proies potentielles. Leur activité de chasse en elle-même pourrait également contribuer à la variabilité temporelle des paysages sonores de ces sites. Une forte variabilité acoustique temporelle pourrait donc refléter le mouvement des prédateurs et/ou de leurs proies.

P1.4.3. Etat acoustique de référence et implication pour les suivis temporels

Cette étude montre l'existence d'une signature acoustique caractéristique à chacun des sites évalués. Des différences significatives existent entre les paysages sonores de trois types d'habitats sur la pente externe du récif corallien d'Europa. Les fortes corrélations mises en évidence indiquent que ces variations acoustiques sont liées aux variations de six fonctions clé dans la dynamique de l'écosystème corallien.

Trois références sont ainsi établies :

- La variabilité spatiale du paysage sonore récifal sur les côtes ouest, nord et est de l'île ;
- Les valeurs de six indices écoacoustiques pour chaque site et par habitat ;
- La nature du lien entre ces indices et des fonctions écosystémiques clés.

Cette première partie de l'étude aurait bénéficié d'enregistrements vidéos et acoustiques collectés durant plusieurs jours sur chaque site, afin de confirmer et renforcer les corrélations mises en évidence. Cependant, nous avons montré dans une précédente étude (Elise *et al.*, en révision) que les sites évalués selon leur niveau de SPL 0.1-0.5 kHz restaient classés de la même façon même quand leurs paysages sonores étaient enregistrés durant des jours et des phases lunaires différents. A Europa, les données ont été collectées durant une période de 10 jours, laissant à penser que la variabilité mesurée entre sites devrait être supérieure à la variabilité intra-site durant ce laps de temps. La stabilité temporelle des autres indices reste à étudier.

L'état de référence établi a au moins deux implications principales :

- Les résultats d'éventuelles études acoustiques ponctuelles réalisées sur ces mêmes sites à l'avenir pourront être comparés aux niveaux établis en avril 2018. Le couplage des suivis GCRMN traditionnels avec des suivis acoustiques pourraient par exemple être envisagé.
- Les liens établis vont pouvoir guider l'interprétation écologique des variations acoustiques enregistrées sur le site de la station fixe (EU10) au cours du temps, en considérant les six indices écoacoustiques comme des proxys du fonctionnement de l'écosystème.

Cette première partie a révélé la capacité de l'outil acoustique à caractériser certains aspects du fonctionnement de l'écosystème corallien. La partie qui suit vise à tester la pertinence de l'outil pour le suivi temporel de l'écosystème et des services associés.

Partie 2 : Suivi acoustique continu, premiers résultats d'avril 2018 à février 2019

P2.1. Objectifs détaillés

Le potentiel de l'acoustique passive pour le suivi à long terme des écosystèmes a été souligné par nombre d'études (voir par exemple Gibb *et al.*, 2019; McWilliam, 2018 pour les récifs coralliens). En domaine marin, des suivis acoustiques ont été mis en place sur des périodes de temps variables (voir liste des études dans Lindseth & Lobel, 2018). L'étude de Lammers & Munger (2016) est la plus semblable au suivi proposé dans le projet CORCOPA. Ces auteurs ont suivi un récif corallien isolé dans l'archipel Hawaïen (French Frigate Shoals) grâce à un enregistreur fixe. Cet enregistreur a collecté 30 secondes de son toutes les 15 minutes durant trois déploiements de plus de 6 mois, entre 2006 et 2009. L'étude de Lammers & Munger (2016) est vraisemblablement la première à s'intéresser à la phénologie de l'écosystème récifal sous un angle acoustique durant d'aussi longues périodes, mais les travaux de Staatermann *et al.* (2014), Bohnenstiehl *et al.* (2016) et Lillis & Mooney (2018), entre autres, ont également apporté des éléments de compréhension des rythmes lunaires et saisonniers.

Ces différentes études se basent sur des protocoles d'enregistrement produisant des échantillons courts et/ou fractionnés (12s toutes les 5min ; 60s toutes les 15 ou 20 min ; 30s toutes les 30 min). Or, nous avons montré dans une précédente étude que des échantillons de longue durée (5min) enregistrés de façon continue étaient plus à même de caractériser les basses fréquences d'un paysage sonore que des échantillons courts (Elise *et al.*, en révision) ; et c'est précisément sur des bandes de basses fréquences qu'est calculée la majorité des indices mis en évidence dans la partie 1. En plus d'assurer un suivi continu du récif d'Europa, le projet CORCOPA pourrait donc apporter un regard nouveau sur la variabilité temporelle des paysages sonores récifaux.

Le premier objectif de cette deuxième partie est d'explorer la variabilité à plusieurs échelles temporelles (circadienne, lunaire, saisonnière) des indices mis en évidence dans la partie 1, et de chercher à l'interpréter en termes écologiques.

Le deuxième objectif est de compléter l'état de référence établi dans l'espace (partie 1) en le déclinant dans le temps. En effet, la rythmicité et l'amplitude des variations constituent en eux-mêmes des références auxquelles nous pourrions comparer de futures observations.

Le troisième objectif est de rendre l'outil opérationnel en automatisant la détection de signaux d'intérêt, et en définissant une « résolution temporelle » de suivi adapté aux objectifs de gestion. Il devra constituer un compromis entre la finesse et la fiabilité de l'information, et l'effort nécessaire à sa production. Notre but étant d'améliorer l'autonomie des TAAF pour les suivis, il est nécessaire de considérer le temps humain que les TAAF sont en capacité de mettre en œuvre pour le traitement et l'analyse de ces données.

Comme dans tout suivi temporel, une année de données est insuffisante pour tirer des conclusions robustes quant à l'existence de cycles lunaires ou saisonniers. Certaines tendances se dégagent cependant.

P2.2. Matériels et méthode

P2.2.1. Site d'implantation

La station fixe a été installée entre le 17 et le 23 avril 2018. Le tripode supportant l'hydrophone a été implanté sur le site EU10, et l'interface terrestre sur la dalle attenante à l'ancienne station météorologique. Ce site avait été choisi au préalable à partir d'images satellites en tenant compte de plusieurs critères :

- la facilité d'installation de la partie marine ;
- l'évitement de zones vivantes du récif sur le tracé du câble ;
- la faible exposition aux vagues et courants ;
- la représentativité du site par rapport à l'ensemble du récif ;
- l'accessibilité de la partie terrestre du système pour les agents de terrain TAAF (vérification et collecte de la donnée) ;
- le non-dérangement de zones terrestres sensibles (nichoirs d'oiseaux).

Le processus d'installation est décrit en détail dans le rapport de campagne (Elise & Bruggemann, 2018).

P2.2.2. Dispositif d'enregistrement et collecte des données

A l'exception de la carte d'acquisition, le dispositif est identique à celui utilisé pour les échantillonnages ponctuels (Partie 1). Les données sont enregistrées par un PC situé dans le conteneur étanche fixé au tripode. Le câble permet à la fois d'alimenter cette partie « mer » et de transférer les données vers un second PC situé à terre. Ce dernier stocke les fichiers de 5min enregistrés en continu sur un disque dur externe de 2 To.

La station a été mise en marche le 23 avril 2018. Les agents de terrain TAAF qui se relayent sur Europa depuis cette date contrôlent de façon hebdomadaire son bon fonctionnement. Ils changent le disque dur externe tous les 3 mois et le renvoient à La Réunion pour que les données soient traitées et analysées.

Vingt-quatre heures d'enregistrement représentent environ 16 Go de données, une année de donnée acoustique « pèse » ainsi près de 6 To. Ces volumes illustrent la nécessité de synthétiser l'information à l'aide d'indices écoacoustiques et d'automatiser la détection de signaux d'intérêts.

P2.2.3. Variabilité temporelle des indices écoacoustiques « fonctionnels »

Afin d'explorer la variabilité temporelle des indices mis en évidence dans la première partie, nous nous sommes intéressés à trois échelles de variations :

- 1- la variabilité circadienne ; nous avons sélectionné 864 échantillons (72h) enregistrés en continu entre 9h00 le 14 mai et 9h00 le 17 mai, durant une phase de nouvelle-lune. Faute de temps, nous n'avons pas visualisé tous ces échantillons. Néanmoins, l'influence des vagues semble extrêmement faible durant ces 3 jours.
- 2- la variabilité journalière au cours de deux cycles lunaires ; nous avons sélectionné 24 échantillons par jour (de 11h à 13h) durant 60 jours consécutifs entre le 30 avril et le 28 juin 2018.

- 3- la variabilité lunaire et saisonnière ; pour chacune des 39 phases lunaires successives du 24 avril 2018 au 4 février 2019, nous avons sélectionné les données du jour même, de la veille, et du lendemain. Ce sont ainsi les données de 117 jours qui ont été compilées. Pour chaque jour, nous avons sélectionné les 24 échantillons enregistrés entre 11h à 13h.

Pour ces deux dernières échelles de variation, chaque échantillon acoustique a été inspecté individuellement à l'aide de spectrogrammes, et écouté lorsque nécessaire, afin d'éliminer les échantillons contenant des bruits de vagues, de bateaux, ou d'impacts d'animaux sur l'hydrophone. Les activités de broutage par les poissons perroquets ont également été annotées lors de cette étape.

En l'absence de perturbations, ce sont donc 72 échantillons de 5 min qui ont été considérés pour caractériser le paysage sonore de chaque phase lunaire au cours des 9 mois. Les six indices écoacoustiques (Partie 1) ont été calculés pour chaque échantillon puis moyennés par phase lunaire.

Afin de compléter cette évaluation, nous avons calculé un septième indice, l'ACI 2 - 7 kHz, mis en évidence lors d'une précédente étude (Elise *et al.*, en révision). A la différence des six autres indices, ce dernier est calculé sur des échantillons de 5 secondes. Nous l'avons calculé quotidiennement du 24 avril 2018 au 4 février 2019 sur l'ensemble des échantillons entre 11h et 13h.

P2.2.4. Détection automatique de signaux d'intérêts

Le développement de la détection automatique est vraisemblablement la clé qui permettra de rendre l'outil réellement opérationnel. Nous avons considéré trois aspects prioritaires :

- la détection de vagues et impacts d'animaux sur l'hydrophone/tripode (l'activité des bateaux étant marginale autour d'Europa), afin de nettoyer les données de façon efficace ;
- la détection d'activité de broutage par les poissons perroquets, fonction clé du fonctionnement de l'écosystème récifal ;
- la détection de clics de dauphins, afin d'évaluer d'éventuelles variations saisonnières dans leur interaction avec le récif.

Pour les 2 premiers types de détection, nous utilisons le package *monitoR* de R (voir chapitre 17 dans Sueur, 2018). Pour le 3^{ème} point, nous testons un algorithme de détection mis au point par NortekMed, encore jamais testé dans un environnement corallien.

L'étape fondamentale de cette démarche est de constituer une « vérité terrain ». En l'absence d'enregistrements vidéo simultanés, elle repose sur la visualisation des spectrogrammes et l'écoute des échantillons.

P2.3. Résultats

La station acoustique a fonctionné en continu de sa mise en route le 23 avril 2018 jusqu'à la panne du 13 mars 2019, disfonctionnement dû à la forte houle formée par le cyclone Idai. Seul 20 minutes de son manquent au moment d'un changement de disque dur le 25 octobre.

P2.3.1. Variabilité circadienne

Les six indices montrent une rythmicité circadienne forte (Fig. 12), marquée par :

- un niveau plus élevé la nuit que le jour pour le bioacoustic index 1-2 kHz, la variabilité spectrale 0-50 kHz et la variabilité temporelle 0-50 kHz ;
- un niveau plus élevé le jour que la nuit pour le SPL 0,1-0,5 kHz, l'ACI 1-2 kHz et le bioacoustic index 0,5 - 1 kHz ;
- des changements rapides à l'aube et au crépuscule ;
- une amplitude de variations plus faible la nuit.

La relation entre ces six indices et les fonctions clé de l'écosystème étant basée sur des échantillons enregistrés de jour, les analyses qui suivent se basent sur des échantillons enregistrés entre 11h et 13h.

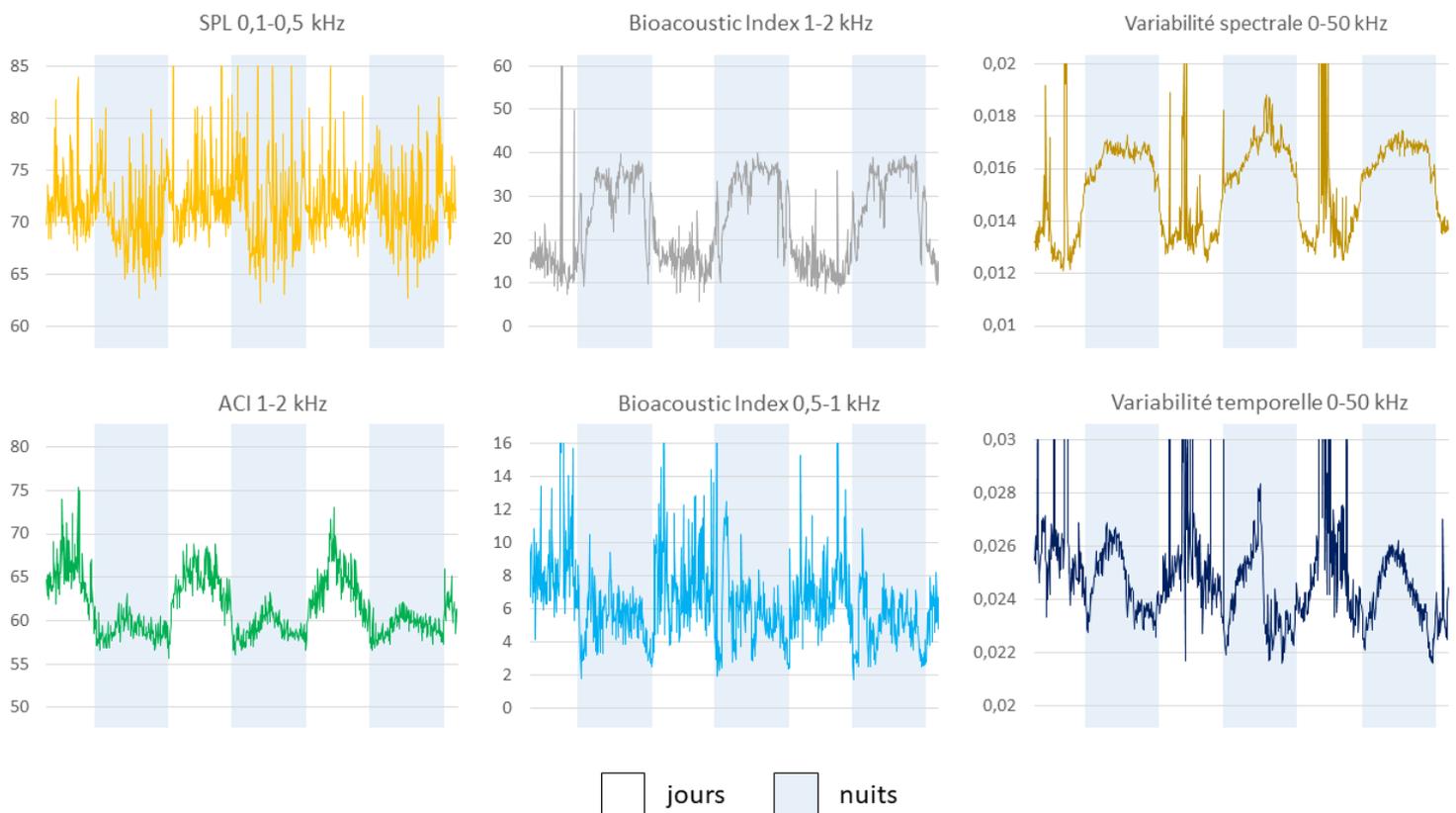


Figure 12. Variabilité circadienne des 6 indices écoacoustiques entre 9h00 le 14 mai et 9h00 le 17 mai (phase de nouvelle lune). Les valeurs de SPL sont en dB_{rms} re $1\mu\text{Pa}$, les autres indices sont sans unité.

P2.3.2. Variabilité lunaire

Les six indices montrent une variabilité importante d'un jour à l'autre (Fig. 13). Cependant l'amplitude des variations sur 60 jours est généralement moindre que les variations entre le jour et la nuit. La plupart des indices présentent des valeurs plus élevées en pleine lune et nouvelle lune qu'en premier et dernier quartier : SPL 0,1-0,5 kHz, bioacoustic index 1-2 kHz, ACI 1-2 kHz, et, dans une moindre mesure, variabilité spectrale 0-50 kHz et bioacoustic index 0,5-1 kHz.

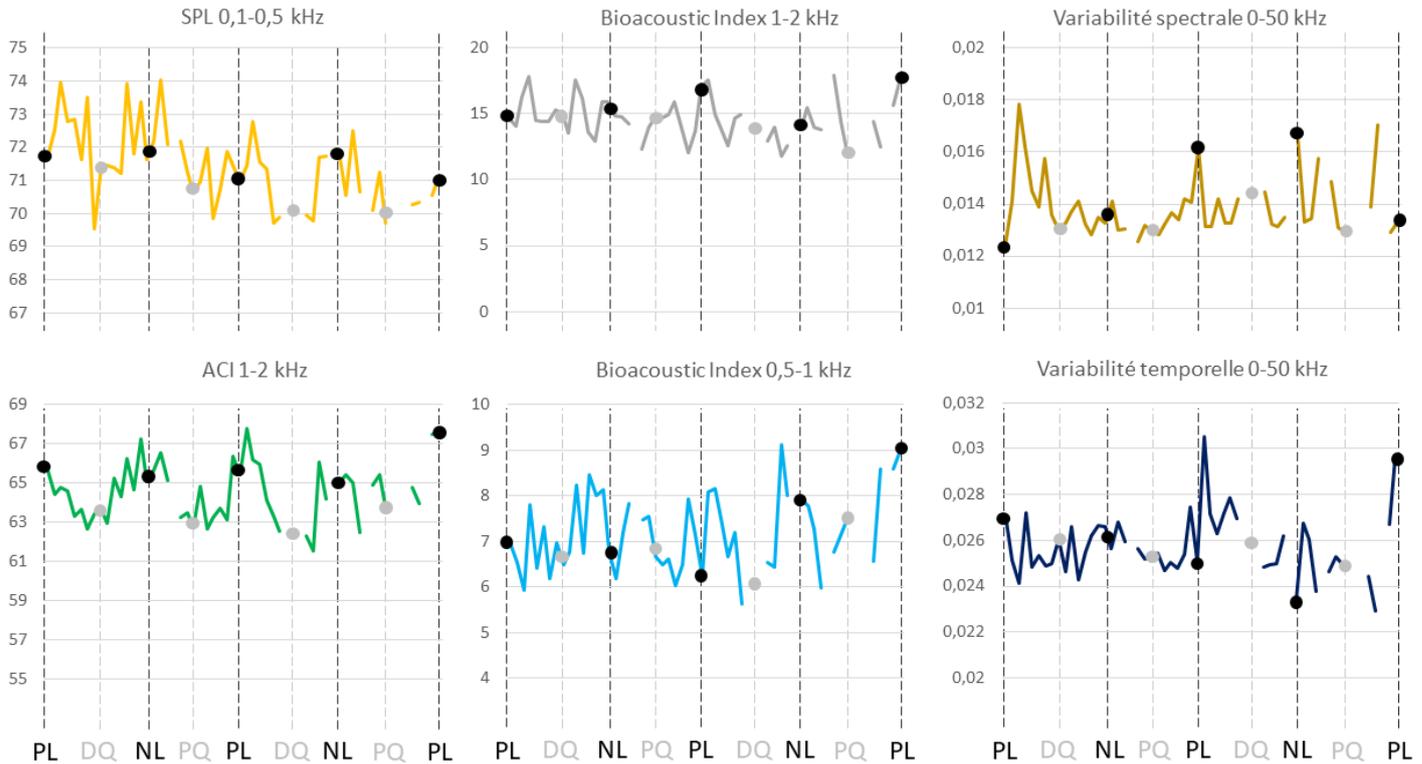


Figure 13. Variabilité des 6 indices écoacoustiques entre le 30 avril et le 28 juin 2018. Les phases lunaires sont indiquées : PL : pleine lune ; DQ : dernier quartier ; NL : nouvelle lune ; PQ : premier quartier. Les valeurs de SPL sont en dB_{rms} re $1\mu\text{Pa}$, les autres indices sont sans unité. Les échantillons perturbés ont été éliminés, occasionnant des « trous » dans les courbes.

P2.3.3. Variabilité saisonnière

Le suivi sur neuf mois confirme la variabilité lunaire du SPL 0,1-0,5 kHz et de l'ACI 1-2 kHz, qui affichent un profil en dents de scie régulier. Les valeurs maximales sont atteintes en pleine lune et nouvelle lune, les minimales en premier et dernier quartiers (Fig. 14). L'ACI 2-7 kHz présente cette même cyclicité lunaire marquée (Fig. 15).

Les bioacoustic index 0,5-1 kHz, bioacoustic index 1-2 kHz et la variabilité temporelle 0-50 kHz montrent des tendances similaires, bien que moins claires et moins régulières (Fig. 14).

Ce suivi sur neuf mois permet également de mettre en évidence la variabilité saisonnière de la majorité des indices. Le SPL 0,1-0,5 kHz présente les variations les plus marquées (Fig. 14). Il atteint son minimum durant l'hiver austral (juillet, août, septembre) et son maximum durant l'été austral (janvier, février, mars). Les bioacoustic index 0,5-1 kHz, bioacoustic index 1-2 kHz et

la variabilité temporelle 0-50 kHz atteignent également leur minimum durant l'hiver austral (Fig. 14).

Les ACI 1-2 kHz et 2-7 kHz présentent un comportement inverse avec un minimum atteint durant l'été austral (Figs. 14 et 15). Les valeurs prises par l'ACI 2-7 kHz durant les phases de premier et dernier quartier en hiver austral sont bien supérieures à celles atteintes durant ces mêmes phases le reste de l'année (Fig. 15).

Les bioacoustic index 0,5-1 kHz et 1-2 kHz, ainsi que les variabilités spectrale et temporelle 0-50 kHz présentent un pic au moment de la pleine lune de novembre (Fig. 14).

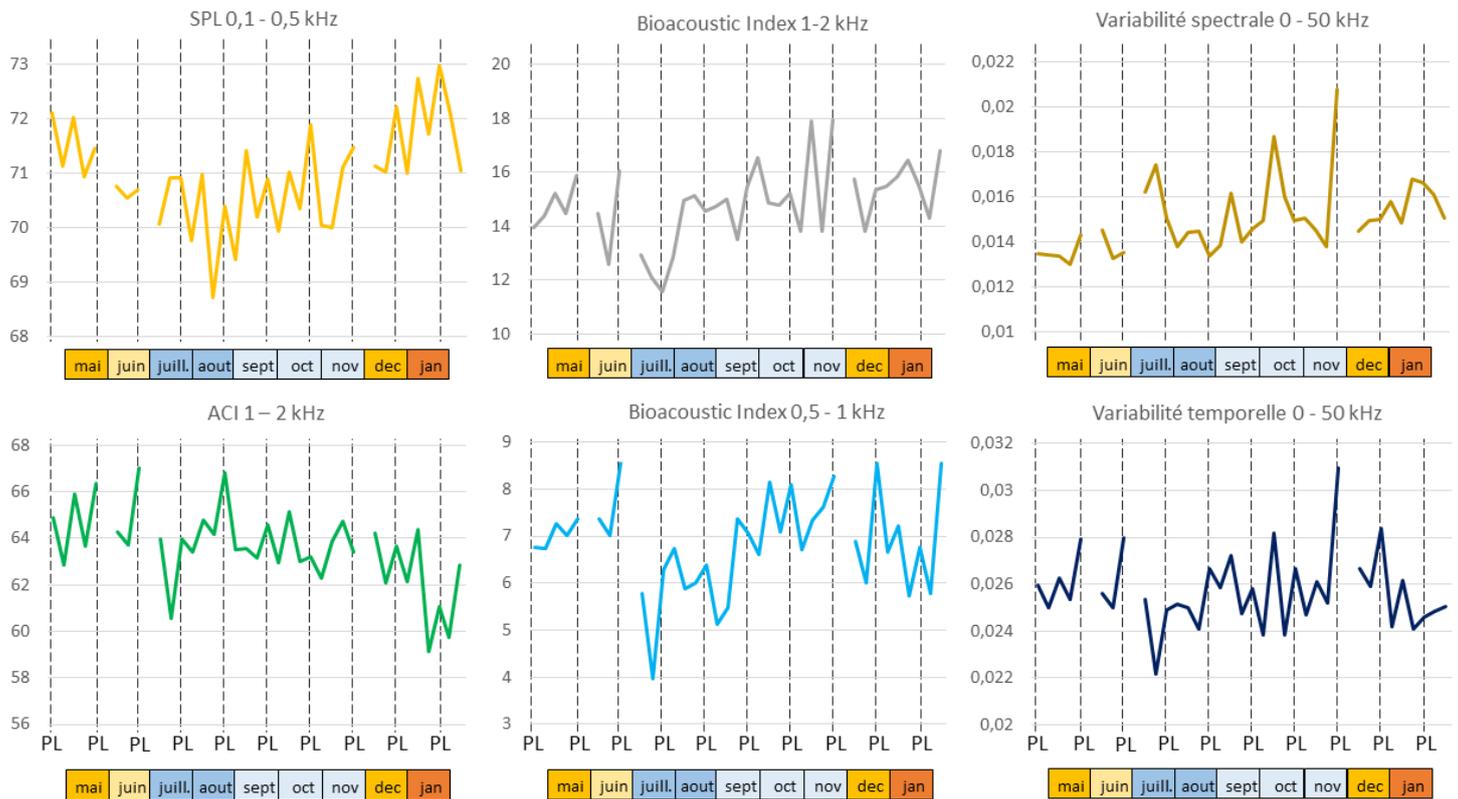


Figure 14. Variabilité des 6 indices écoacoustiques entre le 29 avril 2018 et le 4 février 2019. Les phases de pleine lune (PL) sont indiquées. Les valeurs de SPL sont en dB_{rms} re $1\mu\text{Pa}$, les autres indices sont sans unité. La couleur du cartouche indique la température de l'eau telle qu'estimée par la NOAA (https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/GIS/map_viewer/cpcgis.swf) pour chaque mois. Les échantillons perturbés ont été éliminés, occasionnant des « trous » dans les courbes (3 phases lunaires manquantes).

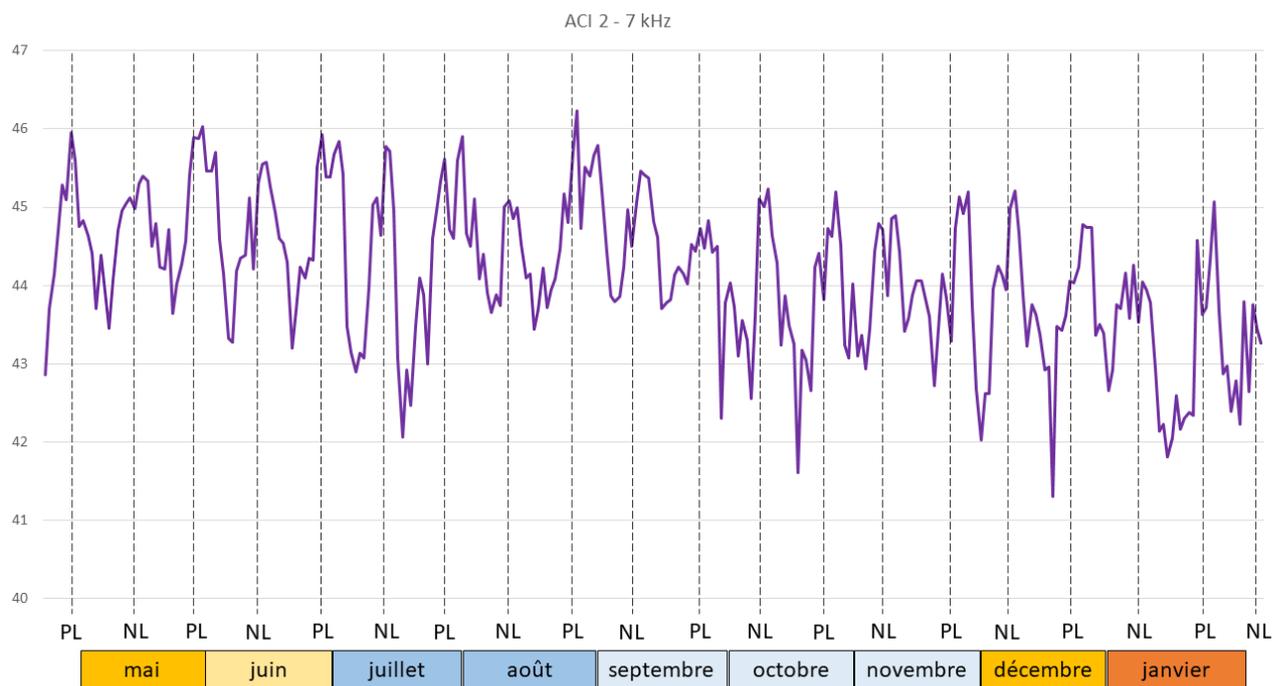


Figure 15. Variabilité de l'ACI 2-7 kHz (calculé quotidiennement sur une sélection d'échantillons de 5sec) entre le 24 avril 2018 et le 4 février 2019. Les phases de pleine lune (PL) et nouvelle lune (NL) sont indiquées. La couleur du cartouche indique la température de l'eau telle qu'estimée par la NOAA (https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/GIS/map_viewer/cpcgis.swf) pour chaque mois.

P2.3.4. Détection automatique

Plus de 2800 échantillons de 5 min ont été analysés pour l'étude des variations lunaire et saisonnière. Leur visualisation à l'aide de spectrogrammes, et leur écoute lorsque nécessaire, a permis de détecter des événements de natures différentes (vagues, pluie, broutage par les poissons perroquets, ...), constituant une vérité terrain conséquente (voir exemples de spectrogrammes en annexe 6).

Les échantillons contenant des événements perturbateurs (vagues fortes, bateaux, impacts d'animaux sur l'hydrophone, ...) n'ont pas été pris en compte dans les calculs des indices. La nécessité de les éliminer est bien illustrée par la comparaison de la figure 14 (échantillons filtrés) avec l'annexe 7 (échantillons non filtrés). Dans ce deuxième cas, les résultats pour la plupart des indices sont inintelligibles, ou peuvent conduire à de mauvaises interprétations.

Cette étape fondamentale est extrêmement chronophage. A titre indicatif, la visualisation des 72 échantillons représentatifs d'une phase lunaire, et le remplissage du fichier Excel « vérité terrain » correspondant nécessitent au minimum entre 40 min et 1 h de travail. La détection automatique de ces différents types de signaux permettrait de gagner un temps précieux de traitement de la donnée.

La vérité terrain étant constituée, nous réalisons actuellement les premiers tests de détection automatisée. Les premiers résultats seront disponibles sous 2 à 3 mois, ils seront transmis aux TAAF pour être annexés au présent rapport.

Concernant les détections de dauphins, la démarche est inverse. Le « détecteur » a déjà été mis au point sur des données collectées à La Réunion. De nombreuses détections ont été répertoriées sur les données collectées à Europa au cours des neuf mois. Il s'agit maintenant de vérifier leur exactitude pour évaluer la possibilité d'utiliser ce détecteur sur les futures données enregistrées à Europa. Les résultats de cette vérification seront également transmis aux TAAF pour être annexés au rapport.

P2.4. Discussion

P2.4.1. Interprétation écologique des variations des indices écoacoustiques et état de référence « temporel »

Calculés sur des échantillons non perturbés (absence de vagues, pluie, impacts d'animaux sur l'hydrophone, ...), les six indices décrivent une cyclicité circadienne et lunaire, et des tendances saisonnières marquées. Ces résultats témoignent des liens existant entre ces indices acoustiques et des activités biologiques.

Dans la partie 1, nous avons mis en évidence des liens entre : i) le SPL 0,1-0,5 kHz, le bioacoustic index 1-2 kHz, la variabilité spectrale 0-50 kHz ; et ii) la complexité de l'habitat, le recouvrement en coraux LFH, et celui en coraux encroûtant. En l'absence de perturbations écologiques majeures, ces caractéristiques de l'habitat ne sont amenées à varier que très lentement dans le temps. La variabilité temporelle observée pour ces indices acoustiques confirme qu'ils sont liés à l'activité d'organismes mobiles (poissons, invertébrés) qui trouvent refuge dans l'habitat récifal. Ces résultats réaffirment que ces trois indices acoustiques permettent une évaluation indirecte de l'habitat.

Variations circadiennes

Les indices acoustiques calculés sur les basses fréquences (SPL 0,1-0,5 kHz et bioacoustic index 0,5-1 kHz) présentent des niveaux moyens plus importants le jour que la nuit à Europa, tout comme à French Frigate Shoals - océan Pacifique - (Lammers & Munger, 2016) ou dans les îles Vierges US - Caraïbes - (Kaplan *et al.*, 2015). Les signaux basse fréquence sont généralement associés à l'activité des poissons (Lobel *et al.*, 2010 ; Tricas & Boyle, 2014), ce qui suggère que cette dernière est plus importante le jour que la nuit sur ces récifs. Cependant, des pics d'activité dans les basses fréquences ont lieu après le coucher du soleil à Europa (ex : SPL 0.1-0.5 kHz). Ces pics pourraient correspondre aux « chorus » produits par certaines espèces de poissons durant les activités de nutrition et reproduction, tels qu'identifiés sur la grande barrière de corail par McWilliam (2018). Ce sont peut-être ces mêmes types de chorus auxquels Staatermann *et al.* (2014) se réfèrent dans leur étude quand ils indiquent que certains types de signaux attribués aux poissons sont plus communs la nuit que le jour dans les keys de Floride.

La variabilité circadienne des indices calculés sur les hautes fréquences (> 2 kHz) est plus détaillée dans la littérature, et directement liée à l'activité des crevettes pistolet (voir Bohnenstiehl *et al.*, 2016 ; Lillis & Mooney, 2018), avec des niveaux plus élevés la nuit que le jour (ex : Bohnenstiehl *et al.*, 2016 ; Lammers & Munger, 2016 ; Lillis & Mooney, 2018). Le son produit par les crevettes pistolet est particulièrement fort dans la bande de fréquences 2 – 30 kHz, mais il influence également des bandes de fréquences inférieures et supérieures (Versluis *et al.*, 2000; Lillis & Mooney, 2018). Par exemple, la bande de fréquence 1-2 kHz contient généralement

relativement peu d'énergie dans les récifs coralliens (ex : Lammers & Munger, 2016 ; Annexe 4) mais est probablement influencée par le son des crevettes pistolet. De même, la variabilité du spectre total est généralement proche de la variabilité des bandes de hautes fréquences (ex : Staatermann *et al.*, 2014 ; Lammers & Munger, 2016). Ainsi la variabilité circadienne de l'ACI 1-2 kHz, du bioacoustic index 1-2 kHz et des variabilités spectrale et temporelle 0-50 kHz est probablement influencée par l'activité des crevettes pistolet.

A Europa, les variations acoustiques à l'aube et au crépuscule sont importantes et associées à des pics d'activité, comme dans les récifs des Caraïbes ou de l'océan Pacifique (ex : Staatermann *et al.*, 2014 ; Kaplan *et al.*, 2015 ; Bohnenstiehl *et al.*, 2016 ; Lammers & Munger, 2016).

Variations lunaires

La majorité des indices que nous avons étudiés suggère des pics d'activité en pleine lune et nouvelle lune sur le récif d'Europa, alors que les phases de premier et dernier quartier semblent plus calmes. Nous avons trouvé trois études ayant suivi le paysage sonore « basse fréquence » de récifs sur plus d'un cycle lunaire (Staatermann *et al.*, 2014 ; Kaplan *et al.*, 2015 ; Lammers & Munger, 2016). Staatermann *et al.* (2014) observent des valeurs plus élevées de SPL durant les phases de nouvelle lune en saison humide. Ils observent également un minimum de complexité dans les basses fréquences (ACI) durant la pleine lune, mais ne présentent les résultats obtenus qu'au cours d'un seul mois, ce qui limite fortement la portée de ce résultat. Les deux autres études ne décrivent pas de cyclicité lunaire. Cette absence de résultats pourrait être expliquée par une phénologie différente des récifs étudiés, mais elle résulte plus probablement de protocoles non adaptés à la caractérisation des paysages sonores basses fréquences dans les études citées (voir P2.1).

La cyclicité lunaire des paysages sonores hautes fréquences est en revanche mieux décrite. Lillis & Mooney (2018) observent un pic d'activité des crevettes pistolet durant les phases de nouvelle lune, et une activité minimale durant les phases de pleine lune, avec une cyclicité d'environ 29 jours. A Europa nous avons étudié les hautes fréquences à l'aide de l'ACI 2-7 kHz et mis en évidence une cyclicité d'environ 14 jours, avec des pics en nouvelle lune et pleine lune. Bien que l'indice employé soit différent, les cyclicités devraient être comparables, ce qui n'est pas le cas. Ces résultats soulèvent au moins deux questions :

- l'ACI permet-il d'évaluer d'autres composants de l'écosystème que le SPL et le « comptage de snaps » (voir Lillis & Mooney, 2018) ne détectent pas ?
- les organismes influant dans les hautes fréquences sont-ils si différents entre les Caraïbes et l'océan Indien qu'ils ont des cycles d'activités différents ?

Une première étape pour y répondre sera de calculer le SPL 2-7 kHz à Europa pour vérifier son éventuelle cyclicité sur 14 jours.

Variations saisonnières

Les deux études avec lesquelles nous pouvons comparer les résultats obtenus à Europa ont été menées dans l'hémisphère nord (Floride : Staatermann *et al.*, 2014 ; Hawaï : Lammers & Munger, 2016). Il convient donc de raisonner en termes d'hiver/été austral, et non en termes de mois pour effectuer ces comparaisons.

Comme dans ces deux études, la majorité des indices écoacoustiques atteignent leur minimum en hiver austral à Europa (saison « sèche » en Floride, saison « froide » à Hawaï), et leur maximum en été austral (saison « humide » en Floride, saison « chaude » à Hawaï). Ces variations sont très probablement liées aux fluctuations annuelles de température de l'eau.

L'ACI, calculé sur les moyennes (1-2 kHz) comme sur les hautes fréquences, à Europa comme en Floride, suit exactement la tendance inverse avec un maximum en hiver austral et un minimum en été austral. Comme précédemment expliqué, ces bandes de fréquences sont influencées par l'activité des crevettes pistolet, laquelle est minimale en saison sèche/hiver austral (Bohnenstiehl *et al.*, 2016). L'ACI a été développé pour détecter des sons éphémères, rapidement modulés et hautement énergétiques, par contraste avec le bruit de fond (Pieretti *et al.*, 2011). Un « snap » de crevette pistolet ayant une durée d'environ 1 ms (Versluis *et al.*, 2000), l'ACI pourrait être adaptée à ce type de détection. Cependant, la valeur prise par l'ACI dépend fortement des paramètres choisis pour son calcul (voir par exemple Bohnenstiehl *et al.*, 2018). Dans notre cas, l'ACI compare l'intensité du signal sur des fenêtres successives de 82 ms. D'après les résultats de Bohnenstiehl *et al.* (2016), l'activité des crevettes peut varier de moins de 2 snaps par seconde en saison sèche/hiver austral (valeur probablement supérieure dans les récifs coralliens, voir Nedelec *et al.*, 2015) à plus de 30 par seconde en saison humide/été austral. Dans ce deuxième cas, il est probable que chaque fenêtre de 82 ms servant au calcul de l'ACI contienne au moins un snap, conduisant à plus de constance du signal entre fenêtres successives, et donc à une valeur d'ACI moindre. Ces observations pourraient expliquer les résultats contre-intuitifs obtenus avec les ACI. Elles ne remettent pas en causes les résultats obtenus à Europa, mais démontrent l'importance de : i) bien comprendre le fonctionnement de l'indice pour ne pas conduire à de mauvaises interprétations ; ii) conserver des paramètres de calcul identiques pour les comparaisons spatiales et/ou temporelles.

Etat de référence « temporel »

Avec moins d'une année de données acoustiques, nous ne pousserons pas plus avant l'interprétation écologique des variations observées. En particulier, la mise en relation des variations temporelles des indices écoacoustiques avec des variations des fonctions écosystémiques clé (liens mis en évidence dans la partie 1) serait prématurée à ce stade. Cette interprétation fonctionnelle demandera *a minima* une année supplémentaire de suivi pour confirmer l'existence de cycles lunaires et saisonniers, ainsi que l'occurrence de pics d'activité ponctuels tels que celui observé à la pleine lune de novembre, et vérifier le sens écologique de ces variations.

Néanmoins, les cyclicités circadiennes et lunaires, ainsi que les tendances saisonnières observées durant cette première année de suivi, contribuent à l'état de référence. L'amplitude de variations des indices entre le jour et la nuit, entre phases lunaires, ou encore entre saisons pourra par exemple être comparée avec les données à venir.

P2.4.2. Vers un outil opérationnel

Tel qu'indiqué dans la partie P2.3, le « nettoyage » de la donnée acoustique à partir de la visualisation des spectrogrammes et de l'écoute des échantillons est autant nécessaire que chronophage. En l'état, cette étape est un frein majeur à l'opérationnalité de l'outil.

La vérité terrain que nous avons constituée est suffisamment conséquente pour envisager de mettre au point des scripts de détection fiables, notamment pour les vagues et le broutage par les poissons perroquets.

Concernant la « résolution temporelle » de suivi, les résultats obtenus suggèrent que le traitement de 2h de son par jour, durant les 3 jours centrés autour de chaque phase lunaire,

permet de suivre à la fois la variabilité lunaire et saisonnière du paysage sonore, deux cycles majeurs qui structurent la dynamique des écosystèmes.

Une fois automatisé le nettoyage des données, le temps humain nécessaire au traitement et à l'analyse d'un disque dur (3 mois de suivi) sera réduit à une journée tout au plus (voir guide méthodologique de traitement et analyse, [ref](#)), et sera relativement peu dépendant de la « résolution temporelle » de suivi. En effet, le temps de traitement et d'analyse des données dépendra essentiellement des possibilités de calculs (puissance de l'ordinateur utilisé) pouvant être mises en œuvre par les TAAF.

Nous proposons dans la dernière partie différentes options pour la mise en œuvre des suivis acoustiques à venir, en fonction des possibilités matérielles et humaines que les TAAF pourront mettre en œuvre.

Partie 3 : Mise en œuvre du suivi acoustique pour la gestion

En proposant l'installation d'une station de suivi acoustique permanente, le projet CORCOPA avait pour objectif de permettre aux TAAF l'accès à des informations nouvelles pour mieux orienter la gestion du patrimoine récifal dont ils ont la responsabilité.

Ce projet vient ainsi appuyer le plan de gestion d'Europa, qui prévoit notamment le maintien du fonctionnement des écosystèmes, la constitution d'un observatoire scientifique de référence et le développement de la communication sur la gestion environnementale menée sur ce territoire.

L'exploitation des données acoustiques produites par la station devrait permettre à terme de :

- comprendre la dynamique temporelle du récif d'Europa ;
- suivre de façon précise des fonctions clés (ex : broutage par les poissons perroquets) ;
- identifier les périodes d'activités particulières sur le récif (agrégations reproductives, nutrition, ...) ;
- analyser la réponse de l'écosystème à des perturbations majeures (blanchissement, cyclones, ...) ;
- identifier les périodes de fréquentation des eaux d'Europa par les dauphins et baleines ;
- analyser d'éventuelles impacts dus à la présence de bateaux et adapter cette fréquentation aux rythmes biologiques identifiés ;
- resituer les résultats des suivis visuels ponctuels dans le contexte de la dynamique globale de l'écosystème ;
- proposer une alternative aux suivis visuels quand ceux-ci ne peuvent être mis en œuvre.

Les agents de terrain TAAF présents sur Europa sont déjà en mesure d'assurer la maintenance de la station (y compris le dépannage de pannes légères) et la collecte des données. Le présent rapport fournit différentes clés d'interprétation écologique des variations des indices écoacoustiques. La dernière étape du projet vise à former les agents TAAF au traitement et à l'analyse de ces données. Les TAAF pourront alors quantifier les impacts à venir sur l'écosystème récifal, mieux appréhender ses dynamiques de réponse et décider d'éventuelles opérations de restauration peu de temps après une perturbation, permettant de stopper l'érosion de la biodiversité associée à ces phénomènes.

L'éco-acoustique est une discipline jeune en évolution. Les progrès rapides à venir viendront certainement bouleverser le contenu de ce rapport et proposeront des techniques d'analyses autrement plus efficace. Pour l'instant, nous proposons une démarche de traitement et d'analyse basée sur le calcul d'indices écoacoustiques et la détection de certains signaux d'intérêt. La constitution progressive d'une sonothèque de signaux d'intérêt permettra vraisemblablement de baser les analyses futures en grande partie sur de la détection automatique.

Nous détaillons ci-dessous comment l'outil peut être mis en œuvre dès à présent, et quelles sont ses évolutions possibles en fonction des moyens que les TAAF pourront y consacrer.

P3.1. Mise en œuvre possible dès à présent

Le guide méthodologique pour le traitement et l'analyse des données collectées à Europa (ref) permet de calculer les sept indices écoacoustiques présentés dans ce rapport. De cette façon, nous avons déjà identifié une cyclicité circadienne et lunaire des paysages sonores d'Europa, ainsi qu'une période d'activité annuelle maximale (i.e. été austral).

Les résultats des suivis à venir permettront de confirmer/infirmes ces premiers constats, et probablement d'affiner l'identification de pics d'activité ponctuels (ex : pleine lune de novembre ?). En fonction de ces résultats, la fréquentation par les bateaux (tourisme, activités scientifiques, ...) pourrait être adaptée. L'impact éventuel de leur présence pourrait en outre être mesuré.

Une récente étude a mis en évidence des modifications significatives des paysages sonores en cas de changement d'état de l'écosystème (Rossi *et al.*, 2017). Les premiers résultats de notre étude permettent d'avoir une première esquisse de l'amplitude avec laquelle les sept indices écoacoustiques proposés peuvent varier au cours de l'année. De plus, ces sept indices décrivent des facettes différentes du fonctionnement de l'écosystème. Ainsi, leur suivi régulier devrait permettre dès maintenant de détecter des changements d'état significatifs.

L'obtention de ces résultats nécessite pour l'instant la visualisation/écoute des échantillons analysés. Chronophage, elle reste néanmoins réalisable. Par exemple, l'agent des TAAF présent à Europa pourrait effectuer cette étape de vérité terrain en changeant le disque dur une fois par mois et en consacrant une demi-journée (une fois familiarisé avec l'analyse des spectrogrammes) à la visualisation (et écoute lorsque nécessaire) des 700-750 échantillons correspondants. Afin d'optimiser cette étape, nous nous sommes fixés le test de trois types de détecteurs automatisés avant le mois de septembre 2019.

P3.2. Mise en œuvre possible d'ici la fin 2019

Afin d'améliorer le nettoyage de la donnée et éviter la phase de vérité terrain chronophage, nous allons tester la mise au point d'un détecteur de vagues et d'un détecteur d'impact d'organismes sur le tripode/hydrophone (voir annexe 6). La détection automatique de ces signaux « perturbateurs » permettra à terme de filtrer efficacement les données avant de procéder au calcul des indices écoacoustiques.

Le troisième type de détecteur que nous souhaitons tester pourrait permettre la détection des événements de broutage par les poissons perroquets (voir annexe 6).

Si les 2 premiers détecteurs venaient à fonctionner, il serait alors intéressant :

- d'étendre le suivi acoustique à l'évaluation quotidienne de 2h d'enregistrement ;
- d'étendre le suivi acoustique à l'évaluation de l'activité en début de nuit ; c'est en effet le moment privilégié par de nombreux organismes, dont les poissons, pour produire des vocalisations. Ces vocalisations deviennent de véritables « chorus » pour certaines espèces, en période de reproduction ou pour des activités de nutrition (ex : McWilliam, 2018).

Des périodes d'agrégations reproductives/de nutrition pourraient ainsi être mises en évidence.

P3.3. Mise en œuvre possible en 2020

La vérification des détections de dauphins enregistrées va demander un travail minutieux afin de corroborer ou non l'efficacité de ce détecteur en milieu récifal. Ce travail pourrait probablement faire l'objet d'un stage de Master 1. En cas d'efficacité avérée du détecteur, le traitement de cette donnée pourrait être automatisé pour permettre un suivi de la fréquentation par les dauphins tout au long de l'année.

La détection de chants de baleines est plus complexe et demanderait une collaboration avec des personnes spécialisées (Olivier Adam ? Yann Doh ? association Globice ? ...), et donc probablement des financements adaptés.

Suivant la volonté des TAAF à poursuivre le suivi acoustique au-delà de 2020, plusieurs options sont à envisager, pour soit maintenir l'outil au niveau d'expertise actuelle, soit augmenter ses capacités :

1- maintien de l'outil : avec un investissement matériel (ordinateur performant) et humain (1 jour/mois) raisonnables, les TAAF sont en mesure de poursuivre le suivi acoustique tel que nous l'avons défini ici (nettoyage de la donnée - éventuellement automatisé -, calculs des sept indices écoacoustiques, tracé des courbes, interprétation)

2- amélioration de l'outil. Le co-encadrement d'une thèse CIFRE entre les TAAF et un laboratoire ayant des compétences en écoacoustique (ex : Museum National d'Histoire Naturel - Paris) et/ou en écologie récifale pourrait être une piste de développement très intéressante. Un tel travail pourrait chercher à constituer une sonothèque de signaux émis par les poissons/invertébrés, entraîner des programmes à les reconnaître de façon automatique (*template matching*, *deep learning*, ...) et ainsi évaluer la variabilité temporelle des activités biologiques sur le récif. Ce travail effectué sur l'écosystème récifal pourrait être couplé au même suivi en milieu terrestre afin de décliner cette étude sur le continuum terre-mer. Selon les financements mobilisables, ces travaux pourraient également être réalisés par un chargé de recherche. Enfin, des stages de Master 2 successifs pourraient aussi permettre d'amorcer cette démarche, mais avec probablement une efficacité bien moindre.

3- extension des suivis. Selon les financements et la volonté des TAAF, l'installation d'autres stations de suivi acoustique serait réalisable à Europa ou dans les autres îles Eparses.

Quelle que soit l'option décidée, des travaux communs de publication peuvent être envisagés dès à présent, pour exposer par exemple comment la mise en œuvre de l'outil répond à certains besoins de gestion.

Conclusions

Le stage de Master 2 réalisé par Marion Coüedel (ref) ainsi que les premiers résultats du suivi acoustique mis en place à Europa mettent en évidence la plus-value importante que peut apporter le suivi écoacoustique à la gestion d'un site isolé comme Europa. Son couplage avec un suivi *in situ* de paramètres physiques (ex : température, salinité, ...) et de la télédétection par satellite par exemple, peut fournir des informations déterminantes aux TAAF afin de mieux orienter les décisions de gestion. Ce bouquet de méthodes de suivi ne remet pas en cause la pertinence des méthodes visuelles (ex : GCRMN) mais peut apporter des informations quasiment en temps-réel là où plusieurs années séparent actuellement deux suivis visuels consécutifs. A terme, cette capacité de diagnostic rapide pourrait permettre aux TAAF de mettre en œuvre des mesures de conservation actives (voir Introduction) pour maintenir la biodiversité et les services écosystémiques des récifs d'Europa. Des outils de suivi complémentaires pourraient être également envisagés à Europa, comme par exemple un suivi vidéo continu sur le site d'implantation de la station acoustique.

Bien sûr, des limites existent à ce type de suivi. La forte houle (vagues de plus de 5m ?) générée par le cyclone Idai en mars 2019 a endommagé le câble qui relie le tripode à l'interface terrestre, nécessitant une intervention prochaine pour le réparer et remettre la station en fonctionnement. Des événements climatiques de cette intensité demeurent néanmoins exceptionnels et ne doivent remettre en cause ni la nécessité ni la faisabilité de la mise en place des suivis continus des écosystèmes marins. Concernant l'acoustique, les TAAF peuvent compter sur le support technique de l'Université de La Réunion et de la société NortekMed dans les prochaines années.

Références

- Anthony, K., Bay, L. K., Costanza, R., Firn, J., Gunn, J., Harrison, P., ... Walshe, T. (2017). New interventions are needed to save coral reefs. *Nature Ecology and Evolution*, 1(10), 1420–1422. doi:10.1038/s41559-017-0313-5
- Bascompte, J., Melián, C. J., & Sala, E. (2005). Interaction strength combinations and the overfishing. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(15), 5443–5447. doi:10.1073/pnas.0501562102
- Bellwood, D. R., Hoey, A. S., & Hughes, T. P. (2012). Human activity selectively impacts the ecosystem roles of parrotfishes on coral reefs. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 279(1733), 1621–1629. doi:10.1098/rspb.2011.1906
- Bellwood, D. R., Streit, R. P., Brandl, S. J., & Tebbett, S. B. (2019). The meaning of the term 'function' in ecology: a coral reef perspective. *Functional Ecology*, 0–1. doi:10.1111/1365-2435.13265
- Bertucci, F., Parmentier, E., Lecellier, G., Hawkins, A. D., Lecchini, D., Costanza, R., ... Simonis, C. (2016). Acoustic indices provide information on the status of coral reefs: an example from Moorea Island in the South Pacific. *Scientific Reports*, 6(August), 33326. doi:10.1038/srep33326
- Boelman, N. T., Asner, G. P., Hart, P. J., & Martin, R. E. (2007). Multi-trophic invasion resistance in Hawaii: Bioacoustics, field surveys, and airborne remote sensing. *Ecological Applications*, 17(8), 2137–2144. doi:10.1890/07-0004.1
- Bohnenstiehl, D. R., Lillis, A., & Eggleston, D. B. (2016). The Curious Acoustic Behavior of Estuarine Snapping Shrimp: Temporal Patterns of Snapping Shrimp Sound in Sub-Tidal Oyster Reef Habitat. *PloS One*, 11(1), e0143691. doi:10.1371/journal.pone.0143691
- Bohnenstiehl, D. R., Lyon, R. P., Caretti, O. N., Ricci, S. W., & Eggleston, D. B. (2018). Investigating the utility of ecoacoustic metrics in marine soundscapes.
- Chabanet, P., Bigot, L., Nicet, J. B., Durville, P., Massé, L., Mulochau, T., ... Obura, D. (2016). Coral reef monitoring in the Iles Eparses, Mozambique Channel (2011-2013). *Acta Oecologica*, 72, 62–71. doi:10.1016/j.actao.2015.10.010
- D'agata, S. S., Mouillot, D., Wantiez, L., Friedlander, A. M., Kulbicki, M., & Vigliola, L. (2016). Marine reserves lag behind wilderness in the conservation of key functional roles. *Nat Commun*, 7. doi:10.1038/ncomms12000
- Darling, E. S., Alvarez-Filip, L., Oliver, T. A., McClanahan, T. R., & Côté, I. M. (2012). Evaluating life-history strategies of reef corals from species traits. *Ecology Letters*, 15(12), 1378–1386. doi:10.1111/j.1461-0248.2012.01861.x
- Edgar, G. J., Stuart-Smith, R. D., Willis, T. J., Kininmonth, S., Baker, S. C., Banks, S., ... & Buxton, C. D. (2014). Global conservation outcomes depend on marine protected areas with five key features. *Nature*, 506(7487), 216.
- Elise, S., & Bruggemann, J.H. (2018) Rapport de campagne CORCOPA, du 16 au 27 avril 2018 à l'île Europa (Iles Eparses, Fr). Université de La Réunion - NortekMed
- Emslie, M. J., Cheal, A. J., MacNeil, M. A., Miller, I. R., & Sweatman, H. P. A. (2018). Reef fish communities are spooked by scuba surveys and may take hours to recover. *PeerJ*, 6, e4886. doi:10.7717/peerj.4886
- ESRI 2018. ArcGIS Desktop: Release 10. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute
- FishBase (2018). <http://www.fishbase.org/> [30 December 2018]
- Freeman, L., & Freeman, S. (2016). Rapidly obtained ecosystem indicators from coral reef soundscapes. *Marine Ecology Progress Series*, 561(January), 69–82. doi:10.3354/meps11938

- Fricke, R., Durville, P., Bernardi, G., Borsa, P., Mou-Tham, G., Chabanet, P. (2013). Checklist of the shore fishes of Europa Island, Mozambique Channel, southwestern Indian Ocean, including 302 new records. *Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde A, Neue Serie*, (6), 247-276.
- Gasc, A., Francomano, D., Dunning, J. B., & Pijanowski, B. C. (2017). Future directions for soundscape ecology: The importance of ornithological contributions. *The Auk*, 134(1), 215–228. doi:10.1642/AUK-16-124.1
- Gibb, R., Browning, E., Glover-Kapfer, P., & Jones, K. E. (2019). Emerging opportunities and challenges for passive acoustics in ecological assessment and monitoring. *Methods in Ecology and Evolution*, 10(2), 169–185. doi:10.1111/2041-210X.13101
- González-Barrios, F. J., & Álvarez-Filip, L. (2018). A framework for measuring coral species-specific contribution to reef functioning in the Caribbean. *Ecological Indicators*, 95(December), 877–886. doi:10.1016/j.ecolind.2018.08.038
- Graham, N. A. J., & Nash, K. L. (2013). The importance of structural complexity in coral reef ecosystems. *Coral Reefs*, 32(2), 315–326. doi:10.1007/s00338-012-0984-y
- Gratwicke, B., & Speight, M. R. (2005). The relationship between fish species richness, abundance and habitat complexity in a range of shallow tropical marine habitats. *Journal of Fish Biology*, 66, 650–667. doi:10.1111/j.1095-8649.2005.00629.x
- Green, A. L., & Bellwood, D. R. (2009). *Monitoring Functional Groups of Herbivorous Reef Fishes as Indicators of Coral Reef Resilience A practical guide for coral reef managers in the Asia Pacific Region*.
- Groner, M. L., Maynard, J., Breyta, R., Carnegie, R. B., Dobson, A., Friedman, C. S., ... & Noble, R. T. (2016). Managing marine disease emergencies in an era of rapid change. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 371(1689), 20150364.
- Hamner, W. M., Colin, P. L., & Hamner, P. P. (2007). Export-import dynamics of zooplankton on a coral reef in Palau. *Marine Ecology Progress Series*, 334, 83–92. doi:10.3354/meps334083
- Harborne, A., Rogers, A., Harborne, A. R., Rogers, A., Bozec, Y., & Mumby, P. J. (2016). Multiple Stressors and the Functioning of Coral Reefs Multiple Stressors and the Functioning of Coral Reefs, (September). doi:10.1146/annurev-marine-010816-060551
- Harris, D. L., Rovere, A., Casella, E., Power, H., Canavesio, R., Collin, A., ... Parravicini, V. (2018). Coral reef structural complexity provides important coastal protection from waves under rising sea levels. *Science Advances*, 4(2), 1–8. doi:10.1126/sciadv.aao4350
- Hoegh-Guldberg, O., Kennedy, E. V., Beyer, H. L., McClennen, C., & Possingham, H. P. (2018). Securing a long-term future for coral reefs. *Trends in Ecology & Evolution*, 12(12), 936–944. doi:10.1016/j.tree.2018.09.006
- Hughes, T. P., Barnes, M. L., Bellwood, D. R., Cinner, J. E., Cumming, G. S., Jackson, J. B. C., ... Scheffer, M. (2017). Coral reefs in the Anthropocene. *Nature*, 546(7656), 82–90. doi:10.1038/nature22901
- Ibrahim, A. K., Chérubin, L. M., Zhuang, H., Schärer Umpierre, M. T., Dalglish, F., Erdol, N., ... & Dalglish, A. (2018). An approach for automatic classification of grouper vocalizations with passive acoustic monitoring. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 143(2), 666–676.
- Kaplan, M. B., Mooney, T. A., Partan, J., & Solow, A. R. (2015). Coral reef species assemblages are associated with ambient soundscapes. *Marine Ecology Progress Series*, 533(AUGUST), 93–107. doi:10.3354/meps11382
- Kennedy, E. V., Holderied, M. W., Mair, J. M., Guzman, H. M., & Simpson, S. D. (2010). 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(1–2), 85–92. doi:10.1016/j.jembe.2010.08.017

- Lammers, M. O., & Munger, L. M. (2016). From shrimp to whales: biological applications of passive acoustic monitoring on a remote Pacific coral reef. In *Listening in the Ocean* (pp. 61-81). Springer, New York, NY.
- Lillis, A., & Mooney, T. A. (2018). Snapping shrimp sound production patterns on Caribbean coral reefs: relationships with celestial cycles and environmental variables. *Coral Reefs*, *37*(2), 1–11. doi:10.1007/s00338-018-1684-z
- Lindseth, A., & Lobel, P. (2018). Underwater Soundscape Monitoring and Fish Bioacoustics: A Review. *Fishes*, *3*(3), 36. doi:10.3390/fishes3030036
- Lobel, P.S., Kaatz, I.M., & Rice, A.N. (2010). Acoustical behavior of coral reef fishes. In K.S. Cole (Ed.), *Reproduction and sexuality in marine fishes* (pp. 307–348). Berkeley, CA: University of California Press.
- MacNeil, M. A., Graham, N. a. J., Cinner, J. E., Wilson, S. K., Williams, I. D., Maina, J., ... McClanahan, T. R. (2015). Recovery potential of the world's coral reef fishes. *Nature*. doi:10.1038/nature14358
- Maire, E., Cinner, J., Velez, L., Huchery, C., Mora, C., D'agata, S., ... Mouillot, D. (2016). How accessible are coral reefs to people? A global assessment based on travel time. *Ecology Letters*, pp. 351–360. doi:10.1111/ele.12577
- McWilliam, J. N. (2018). Coral reef soundscapes: The use of passive acoustic monitoring for long-term ecological survey. Thèse de doctorat. Retrieved from <https://espace.curtin.edu.au/handle/20.500.11937/66550>
- Mellin, C., Mouillot, D., Kulbicki, M., McClanahan, T.R., Vigliola, L., Bradshaw, C.J.A., ... Friedlander, A. M. (2016). Humans and seasonal climate variability threaten large-bodied coral reef fish with small ranges. *Nature Communications*, *7*, 10491.
- Myers, E., Harvey, E., Saunders, B., & Travers, M. (2016) Fine-scale patterns in the day, night and crepuscular composition of a temperate reef fish assemblage. *Marine Ecology*, *37* (3), 668-678.
- Nedelec, S. L., Simpson, S. D., Holderied, M., Radford, A. N., Lecellier, G., Radford, C., & Lecchini, D. (2015). Soundscapes and living communities in coral reefs: temporal and spatial variation. *Marine Ecology Progress Series*, *524*, 125-135.
- Pieretti, N., Farina, A., & Morri, D. (2011). A new methodology to infer the singing activity of an avian community: The Acoustic Complexity Index (ACI). *Ecological Indicators*, *11*(3), 868–873. doi:10.1016/j.ecolind.2010.11.005
- Pijanowski, B. C., Farina, A., Gage, S. H., Dumyahn, S. L., & Krause, B. L. (2011a). What is soundscape ecology? An introduction and overview of an emerging new science. *Landscape Ecology*, *26*(9), 1213–1232. doi:10.1007/s10980-011-9600-8
- Pijanowski, B. C., Villanueva-Rivera, L. J., Dumyahn, S. L., Farina, A., Krause, B. L., Napoletano, B. M., ... Pieretti, N. (2011b). Soundscape Ecology: The Science of Sound in the Landscape. *BioScience*, *61*(3), 203–216. doi:10.1525/bio.2011.61.3.6
- Pratchett, M. S., Munday, P. L., Wilson, S. K., Graham, N. a J., Cinner, J. E., Bellwood, D. R., ... McClanahan, T. R. (2008). Effects of climate-induced coral bleaching on coral-reef fishes - Ecological and economic consequences. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, *46*, 251–296. doi:10.1201/9781420065756.ch6
- QGIS Development Team (2018) QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>
- R Core Team (2018). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>

- Radford, C., Jeffs, A., Tindle, C., & Montgomery, J. C. (2008). Resonating sea urchin skeletons create coastal choruses. *Marine Ecology Progress Series*, 362, 37–43.
doi:10.3354/meps07444
- Rau, G. H., McLeod, E. L., & Hoegh-Guldberg, O. (2012). The need for new ocean conservation strategies in a high-carbon dioxide world. *Nature Climate Change*, 2(10), 720–724.
doi:10.1038/nclimate1555
- Rossi, T., Connell, S. D., & Nagelkerken, I. (2017). The sounds of silence: Regime shifts impoverish marine soundscapes. *Landscape ecology*, 32(2), 239-248.
- Staaterman, E., Paris, C. B., DeFerrari, H. A., Mann, D. A., Rice, A. N., & D'Alessandro, E. K. (2014). Celestial patterns in marine soundscapes. *Marine Ecology Progress Series*, 508, 17-32.
- Staaterman, E., Ogburn, M. B., Altieri, A. H., Brandl, S. J., Whippo, R., Seemann, J., ... & Duffy, J. E. (2017). Bioacoustic measurements complement visual biodiversity surveys: preliminary evidence from four shallow marine habitats. *Marine Ecology Progress Series*, 575, 207-215.
- Sueur, J. (2018). *Sound Analysis and Synthesis with R*. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-319-77647-7>
- Sueur, J., Farina, A., Gasc, A., Pieretti, N., & Pavoine, S. (2014). Acoustic indices for biodiversity assessment and landscape investigation. *Acta Acustica United with Acustica*, 100(4), 772–781. doi:10.3813/AAA.918757
- Tricas, T. C., & Boyle, K. S. (2014). Acoustic behaviors in Hawaiian coral reef fish communities. *Marine Ecology Progress Series*, 511, 1–16. doi:10.3354/meps10930
- Veron, J.E.N. (2000) *Corals of the World* Vols 1–3. Australian Institute of Marine Science.
- Versluis, M., Schmitz, B., von der Heydt, A., & Lohse, D. (2000). How Snapping Shrimp Snap: Through Cavitating Bubbles. *Science*, 289(5487), 2114–2117.
doi:10.1126/science.289.5487.2114
- Wilson, S.K., Burgess, S.C., Cheal, A.J., Emslie, M., Fisher, R., Miller, I., ...Sweatman, H.P. (2008). Habitat utilization by coral reef fish: implications for specialists vs. generalists in a changing environment. *Journal of Animal Ecology*, 77(2), 220-228.

ANNEXES

Annexe 1. Espèces représentant les trois fonctions « poisson » considérées dans cette étude

Famille	Genre	Espèce	Fonction
Acanthuridae	Acanthurus	dussumieri	Brouteur
Acanthuridae	Acanthurus	lineatus	Brouteur
Acanthuridae	Acanthurus	nigricauda	Brouteur
Acanthuridae	Acanthurus	nigrofuscus	Brouteur
Acanthuridae	Acanthurus	sp	Brouteur
Acanthuridae	Acanthurus	tristis	Brouteur
Acanthuridae	Acanthurus	xanthopterus	Brouteur
Acanthuridae	Zebrasoma	scopas	Brouteur
Blenniidae	Cirripectes	sp	Brouteur
Pomacanthidae	Centropyge	multispinis	Brouteur
Pomacanthidae	Centropyge	sp	Brouteur
Pomacentridae	Plectroglyphidodon	johnstonianus	Brouteur
Scaridae	Chlorurus	sordidus	Brouteur
Scaridae	Chlorurus	strongylocephalus	Brouteur
Scaridae	Hipposcarus	harid	Brouteur
Scaridae	Scarus	caudofasciatus	Brouteur
Scaridae	Scarus	frenatus	Brouteur
Scaridae	Scarus	ghobban	Brouteur
Scaridae	Scarus	globiceps	Brouteur
Scaridae	Scarus	psittacus	Brouteur
Scaridae	Scarus	rubroviolaceus	Brouteur
Scaridae	Scarus	scaber	Brouteur
Scaridae	Scarus	sp	Brouteur
Scaridae	Scarus	tricolor	Brouteur
Acanthuridae	Acanthurus	thompsoni	Planctonophage
Atherinidae		spp	Planctonophage
Balistidae	Melichthys	niger	Planctonophage
Balistidae	Odonus	niger	Planctonophage
Caesionidae	Caesio	lunaris	Planctonophage
Caesionidae	Caesio	teres	Planctonophage
Caesionidae	Pterocaesio	tile	Planctonophage
Holocentridae	Myripristis	murdjan	Planctonophage
Labridae	Cirrhilabrus	exquisitus	Planctonophage
Labridae	Thalassoma	amblycephalum	Planctonophage
Pempherididae	Pempheris	sp	Planctonophage
Pomacentridae	Chromis	dimidiata	Planctonophage
Pomacentridae	Chromis	lepidolepis	Planctonophage
Pomacentridae	Chromis	sp	Planctonophage
Pomacentridae	Chromis	ternatensis	Planctonophage
Pomacentridae	Chromis	weberi	Planctonophage
Pomacentridae	Pomachromis	richardsoni	Planctonophage
Ptereleotridae	Nemateleotris	magnifica	Planctonophage

Ptereleotridae	Ptereleotris	evides	Planctonophage
Serranidae	Pseudanthias	evansi	Planctonophage
Serranidae	Pseudanthias	squamipinnis	Planctonophage
Balistidae	Balistoides	viridescens	Consommateur tertiaire
Carangidae	Caranx	lugubris	Consommateur tertiaire
Carangidae	Caranx	melampygnus	Consommateur tertiaire
Carangidae	Caranx	sp	Consommateur tertiaire
Carcharhinidae	Carcharhinus	galapagensis	Consommateur tertiaire
Carcharhinidae	Triaenodon	obesus	Consommateur tertiaire
Haemulidae	Plectorhinchus	obscurus	Consommateur tertiaire
Haemulidae	Plectorhinchus	sp	Consommateur tertiaire
Labridae	Bodianus	bilunulatus	Consommateur tertiaire
Labridae	Cheilinus	undulatus	Consommateur tertiaire
Labridae	Coris	aygula	Consommateur tertiaire
Labridae	Hemigymnus	fasciatus	Consommateur tertiaire
Lethrinidae	Lethrinus	obsoletus	Consommateur tertiaire
Lethrinidae	Monotaxis	grandoculis	Consommateur tertiaire
Lutjanidae	Aphareus	furca	Consommateur tertiaire
Lutjanidae	Aprion	virescens	Consommateur tertiaire
Lutjanidae	Lutjanus	argentimaculatus	Consommateur tertiaire
Lutjanidae	Lutjanus	bohar	Consommateur tertiaire
Mullidae	Parupeneus	barberinus	Consommateur tertiaire
Serranidae	Aethaloperca	rogaa	Consommateur tertiaire
Serranidae	Cephalopholis	argus	Consommateur tertiaire
Serranidae	Cephalopholis	sp	Consommateur tertiaire
Serranidae	Epinephelus	fuscoguttatus	Consommateur tertiaire
Serranidae	Epinephelus	polyphkadion	Consommateur tertiaire
Serranidae	Epinephelus	sp	Consommateur tertiaire
Serranidae	Epinephelus	tauvinia	Consommateur tertiaire
Serranidae	Epinephelus	tukula	Consommateur tertiaire
Serranidae	Plectropomus	laevis	Consommateur tertiaire
Serranidae	Variola	louti	Consommateur tertiaire

Annexe 2. Calcul des indices écoacoustiques

Recent studies have demonstrated that ecoacoustic indices (ACI, H) are sensitive to both number and diversity of sounds produced by fishes, without possibility to disentangle between the influence of each (Bolgan *et al.*, 2018; Bohnenstiehl *et al.*, 2018). Moreover, these studies highlighted that the performances of ACI and H were strongly dependent on the frequency-time resolution settings chosen to calculate them. For Bolgan *et al.* (2018), it appears that each specific situation requires ad hoc settings for the ACI to be representative of variation in fish sound abundance and diversity.

We took these elements into account by: i) keeping in mind that no distinction between sound abundance and diversity was possible when interpreting the results of H and ACI; ii) choosing resolution settings close to those considered as optimal by Bolgan *et al.* (2018) and Bohnenstiehl *et al.* (2018). In fact, coarse frequency resolutions (>31.2 Hz) produced poor results in these studies while too fine resolution (7.8 Hz) was not deemed suitable (Bolgan *et al.*, 2018). The sampling rate of the recording device (fs) and the number of points used in calculating the Fast Fourier Transform (NFFT) define the frequency resolution of the analysis ($\Delta f = fs/NFFT$). With our recording device having a sampling rate of 100 000 Hz, we chose to use 8192 points in the calculation of FFT for ACI and H, to match a frequency resolution of 12.2 Hz, close to the 15.6 Hz and 23.4 Hz highlighted by Bolgan *et al.* (2018) and Bohnenstiehl *et al.* (2018), respectively. The same number of points (8192) was also used in the calculation of Bioacoustic Index and sh.

Each of the 6 following acoustic metrics were calculated on 5 frequency bands (0.1-0.5 kHz; 0.5-1 kHz; 1-2 kHz; 2-7 kHz; 0.1-50 kHz):

1- Sound Pressure Level (SPL). Sound level was calculated as the Root Mean Square of Sound Pressure Level [rms(SPL)] using a software developed by NORTEKMED S.A.S. (Toulon, France). The software first calculated Sound Exposure Level (SEL) values with a Fast Fourier Transformation (FFT) size of 131,072 points and a Hamming window, matching a 0.762 Hz resolution. SPL values, in dB_{rms} re 1 μ Pa, were then calculated with formulas integrating SEL values on each frequency band.

2- Bioacoustic Index (BI) was calculated using the function “bioacoustic_index” from the package “soundecology” (Villanueva-Rivera & Pijanowski, 2016) of R software. It represents the area under the curve of the dB mean spectrum between two frequency limits (Sueur, 2018). Area value is a function of both the sound level and the number of frequency bands used in the sample (Boelman *et al.*, 2007).

3- Spectral entropy (sh) was calculated using the function “sh” from the package “seewave” (Sueur *et al.*, 2008a) of R software. As it represents the Shannon evenness of the frequency spectrum (Sueur, 2018), sh provides a measurement of the diversity of frequency peaks in the sample.

4- Temporal entropy (th) was calculated using the function “th” from the package “seewave” (Sueur *et al.*, 2008a) of R software. As it represents the Shannon evenness of the amplitude envelop (Sueur, 2018), th provides a measurement of the temporal stability in the sample.

5- Acoustic entropy index (H) was calculated using the function “H” from the package “seewave” (Sueur *et al.*, 2008a) of R software. Comprising both temporal and spectral entropy, it attempts to measure the average diversity within an acoustic community and should increase with the number of vocalizing species and evenness of the acoustic environment (Sueur *et al.*, 2008b).

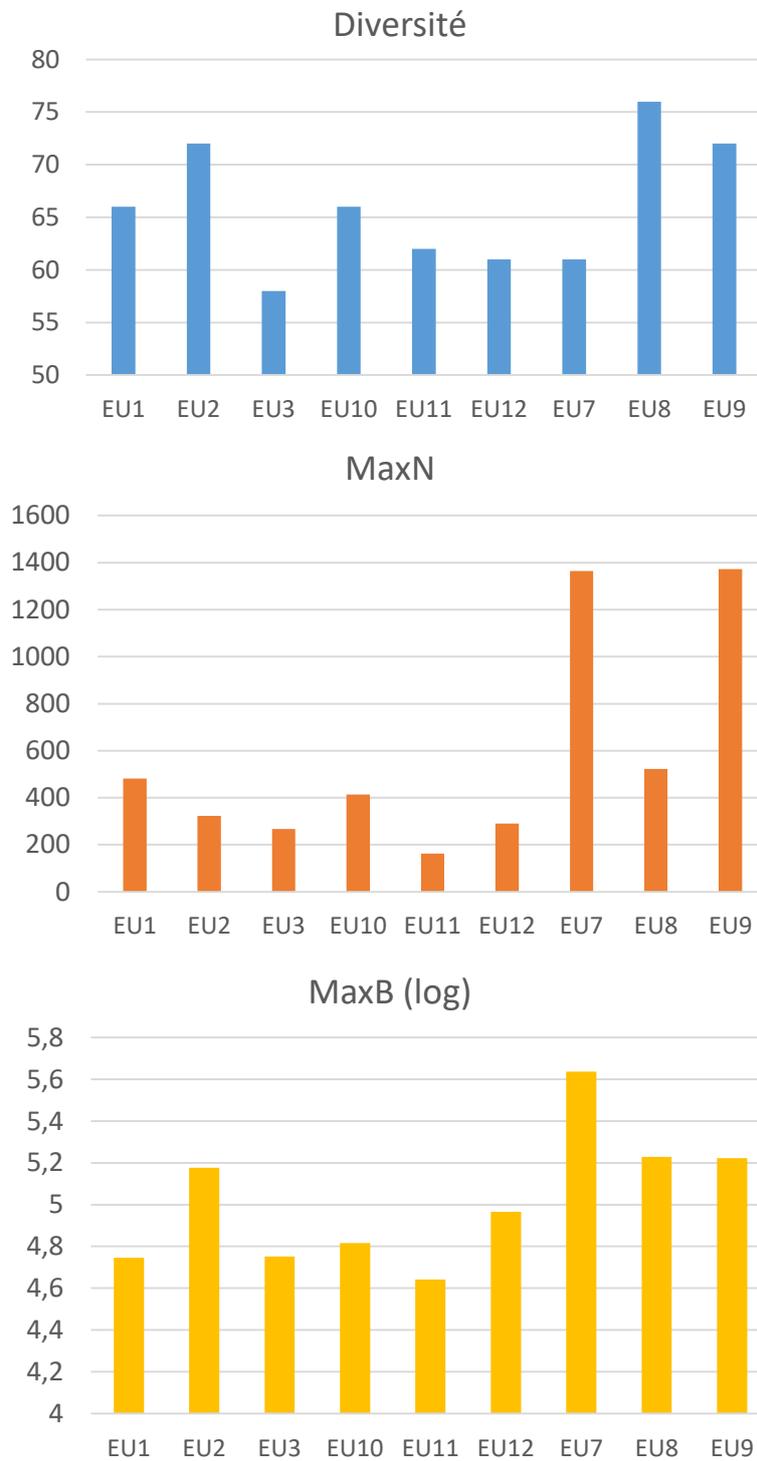
6- Acoustic Complexity Index (ACI) was calculated using the function “ACI” from the package “seewave” (Sueur *et al.*, 2008a) of R software. The ACI measures the variation in sound intensity within a recording over changing frequencies (see Pieretti *et al.*, 2011). Originally developed by these authors for analysing avian communities, the ACI was later successfully applied to marine habitats (ex : Harris *et al.*, 2016, Bertucci *et al.*, 2016, Staaterman *et al.*, 2017).

For H, sh and th calculations on narrow bandwidths (0.1-0.5 kHz; 0.5-1 kHz; 1-2 kHz; 2-7 kHz), we first used the functions “fir” from seewave package and “normalize” from tuneR to filter sound samples (Ligges *et al.*, 2018).

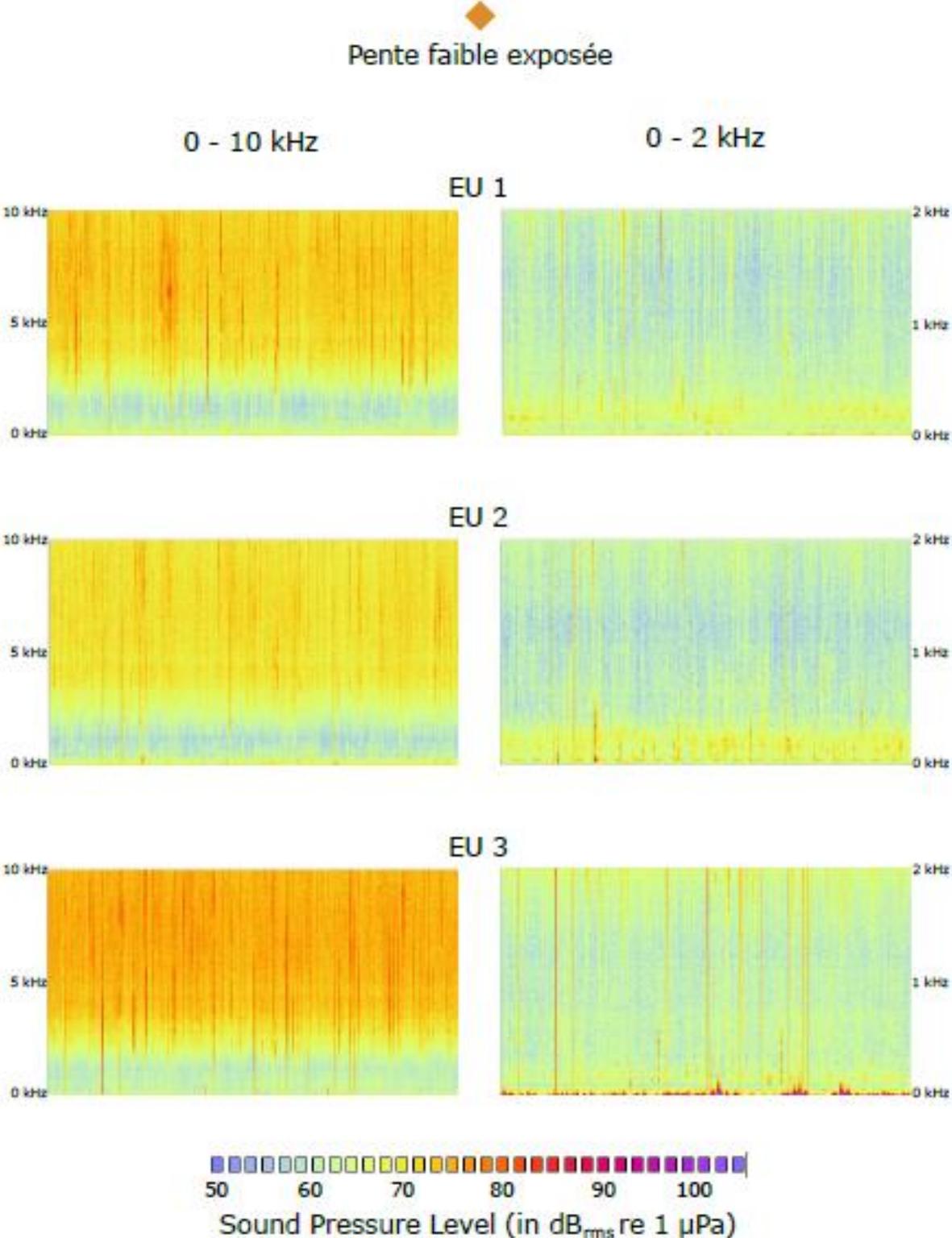
Specific references

- Harris, S.A., Shears, N.T., & Radford, C.A. (2016). Ecoacoustic indices as proxies for biodiversity on temperate reefs. *Methods in Ecology and Evolution*, 7(6), 713-724.
- Ligges U., Krey S., Mersmann O., & Schnackenberg S. (2018) tuneR: Analysis of Music and Speech. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=tuneR>, R package
- Sueur J., Aubin T., & Simonis C. (2008a) seewave: a free modular tool for sound analysis and synthesis. *Bioacoustics*, 18:213–226.
- Sueur J., Pavoine S., Hamerlynck O., & Duvail S. (2008b). Rapid acoustic survey for biodiversity appraisal. *PLoS ONE*. 3: e4065. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0004065>
- Villanueva-Rivera L.J., & Pijanowski B.C. (2016) soundecology: soundscape ecology. <https://CRAN.R-project.org/package=soundecology>, R package

Annexe 3. Descripteurs globaux des assemblages de poissons sur les neuf sites évalués : a) diversité (nombre d'espèces) ; b) MaxN (abondance) ; c) MaxB (biomasse)



Annexe 4. Spectrogrammes sur les bandes de fréquences 0 – 10 kHz et 0 – 2 kHz sur chacun des neuf sites. Les spectrogrammes ont été calculés sur un seul échantillon choisi aléatoirement sur chaque site



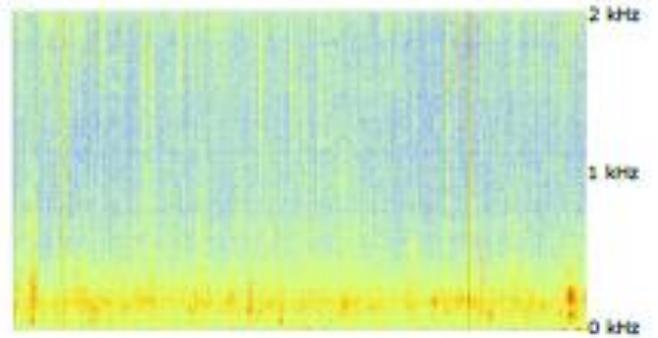
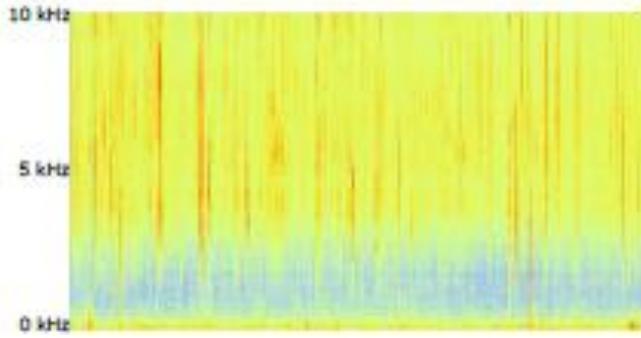


Pente faible protégée

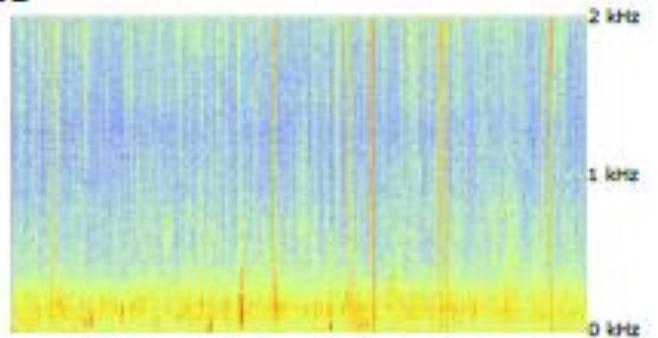
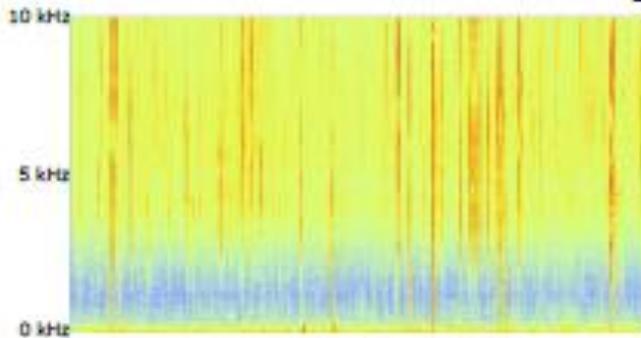
0 - 10 kHz

0 - 2 kHz

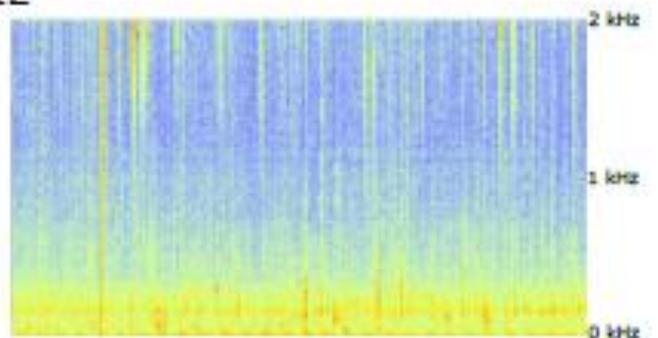
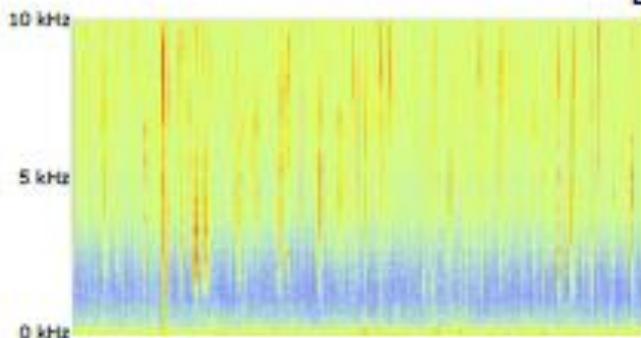
EU10



EU11



EU12

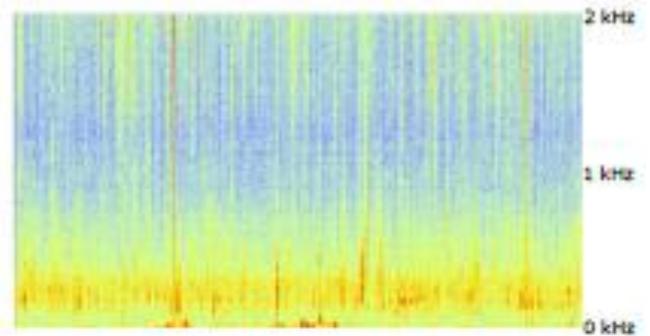
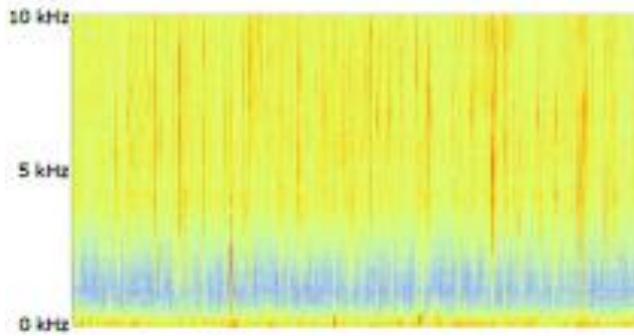


▲
Pente forte

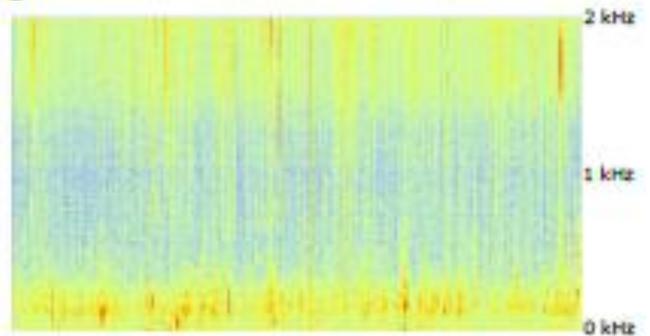
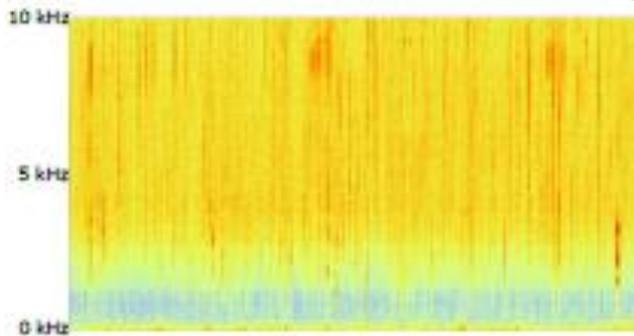
0 - 10 kHz

0 - 2 kHz

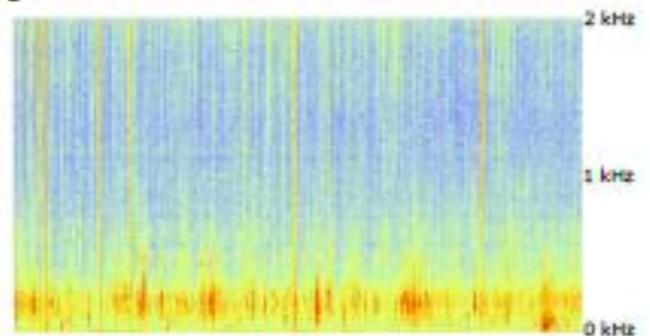
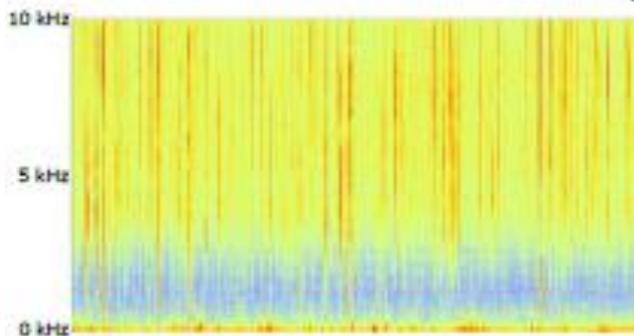
EU 7



EU 8



EU 9

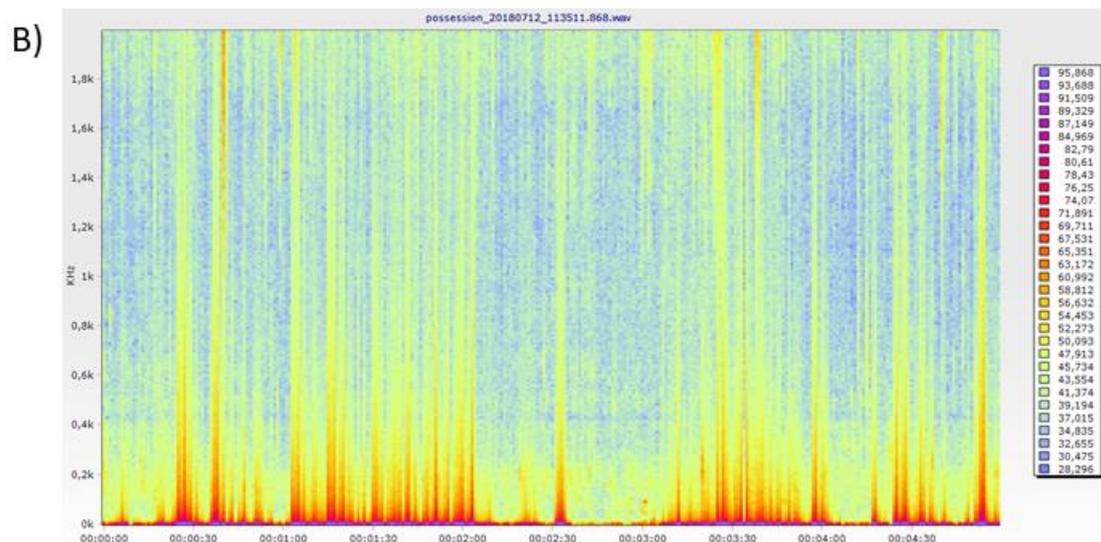
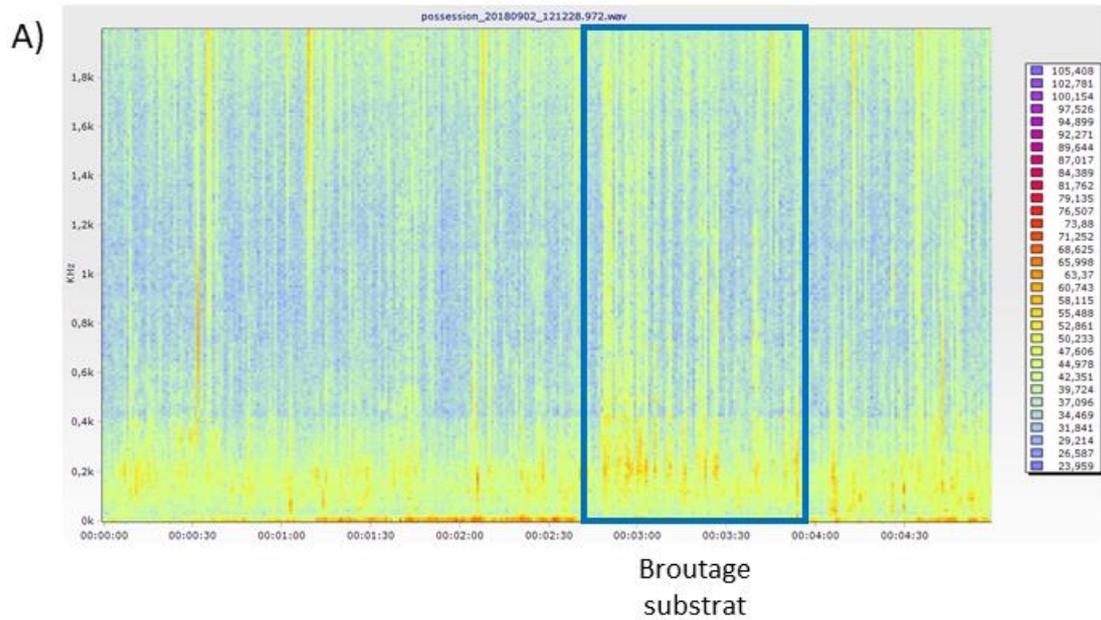


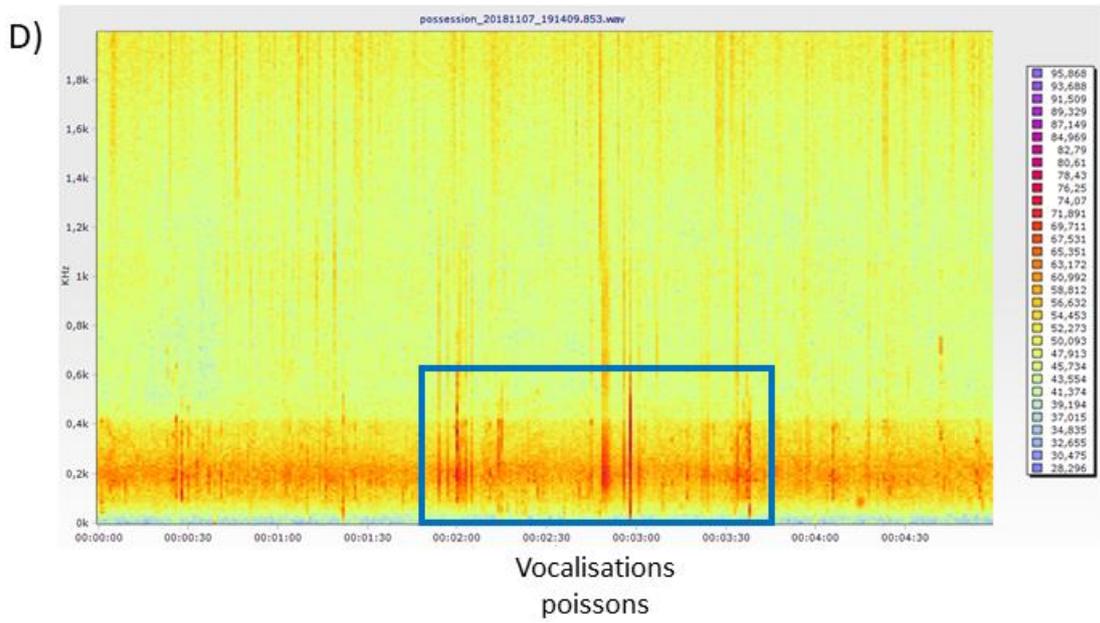
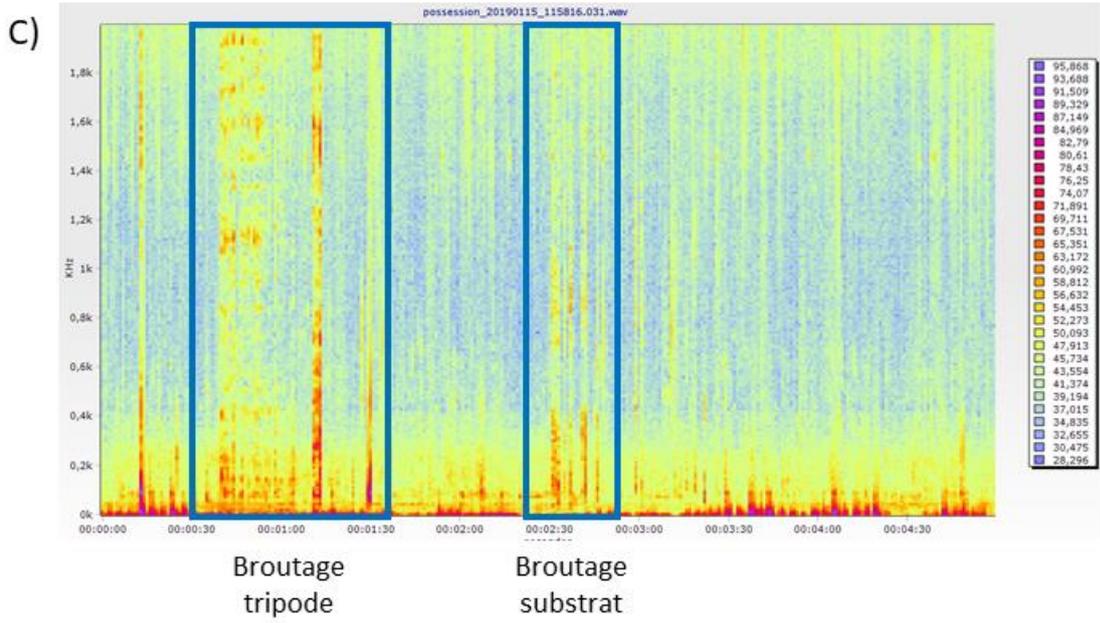
Annexe 5. Valeur et significativité des corrélations entre les 30 indices acoustiques et les 12 fonctions écosystémiques clé

Index with bandwidth in kHz	BENTHOS			DIV FISHES			ABUND FISHES			BIOM FISHES		
	Hab comp	ENC corals	LFH corals	DIV GZ	DIV PK	DIV TC	ABUND GZ	ABUND PK	ABUND TC	BIOM GZ	BIOM PK	BIOM TC
SPL 0-50	-0,73	0,80	0,03	-0,45	0,00	-0,34	-0,23	-0,23	-0,18	0,16	-0,49	-0,30
SPL 0,1-0,5	0,91	-0,63	0,49	0,66	0,52	0,33	0,06	0,62	0,57	0,43	0,73	0,38
SPL 0,5-1	-0,16	0,28	-0,04	0,08	0,01	-0,25	-0,01	0,09	-0,19	0,40	-0,04	-0,24
SPL 1-2	-0,57	0,61	0,21	-0,47	0,01	-0,15	-0,34	-0,27	0,00	0,10	-0,53	-0,16
SPL 2-7	-0,68	0,75	0,06	-0,43	0,00	-0,29	-0,24	-0,21	-0,13	0,19	-0,50	-0,30
ACI 0-50	0,53	-0,52	0,17	0,33	-0,05	0,58	0,50	0,55	0,60	0,30	0,29	0,16
ACI 0,1-0,5	-0,08	0,48	0,46	0,17	0,12	0,38	0,19	0,29	0,50	0,62	-0,13	0,21
ACI 0,5-1	0,14	0,18	0,22	0,45	0,00	0,41	0,28	0,34	0,34	0,67	-0,01	0,16
ACI 1-2	0,31	0,08	0,20	0,59	0,25	0,28	0,56	0,81	0,51	0,87	0,43	0,01
ACI 2-7	0,67	-0,57	0,07	0,56	0,04	0,40	0,61	0,65	0,44	0,34	0,59	0,15
H 0-50	-0,11	-0,35	-0,65	-0,15	-0,43	-0,36	-0,16	-0,51	-0,74	-0,60	-0,14	-0,27
H 0,1-0,5	-0,49	0,08	-0,65	-0,34	-0,54	-0,12	0,15	-0,28	-0,53	-0,26	-0,43	-0,28
H 0,5-1	-0,63	0,64	-0,24	-0,25	-0,27	-0,05	0,39	0,13	-0,05	0,33	-0,38	-0,35
H 1-2	-0,07	-0,02	-0,59	0,28	-0,31	-0,09	0,61	0,34	-0,30	0,29	0,15	-0,33
H 2-7	-0,72	0,35	-0,37	-0,69	-0,41	-0,39	-0,49	-0,90	-0,65	-0,72	-0,73	-0,26
BI 0-50	-0,72	0,55	-0,02	-0,65	-0,29	0,07	-0,13	-0,29	0,05	-0,02	-0,78	-0,23
BI 0,1-0,5	0,71	-0,66	0,32	0,37	0,14	0,50	-0,01	0,14	0,43	-0,11	0,34	0,49
BI 0,5-1	0,91	-0,54	0,28	0,84	0,50	0,16	0,29	0,68	0,32	0,40	0,96	0,38
BI 1-2	0,35	0,14	0,85	0,22	0,57	0,46	-0,14	0,32	0,76	0,37	0,22	0,60
BI 2-7	-0,61	0,21	-0,58	-0,50	-0,45	-0,13	0,02	-0,36	-0,46	-0,38	-0,53	-0,26
sv 0-50	-0,69	0,83	0,24	-0,51	0,12	-0,24	-0,29	-0,24	0,04	0,09	-0,49	-0,19
sv 0,1-0,5	0,64	-0,31	0,63	0,37	0,56	0,16	-0,19	0,27	0,53	0,13	0,52	0,36
sv 0,5-1	0,53	-0,63	0,16	0,11	0,21	-0,05	-0,43	-0,24	-0,06	-0,48	0,32	0,28
sv 1-2	-0,08	0,02	0,40	-0,46	0,15	-0,07	-0,70	-0,59	0,04	-0,56	-0,29	0,22
sv 2-7	-0,68	0,64	-0,09	-0,52	0,04	-0,58	-0,41	-0,37	-0,41	-0,08	-0,40	-0,38
tv 0-50	0,77	-0,38	0,54	0,65	0,39	0,65	0,46	0,81	0,83	0,61	0,63	0,49
tv 0,1-0,5	-0,27	0,64	0,32	0,05	0,16	-0,08	0,05	0,13	0,21	0,50	-0,12	-0,12
tv 0,5-1	0,46	-0,07	0,38	0,63	0,29	0,45	0,18	0,51	0,51	0,68	0,29	0,32
tv 1-2	0,42	0,01	0,39	0,60	0,38	0,44	0,42	0,81	0,68	0,85	0,42	0,20
tv 2-7	0,83	-0,53	0,31	0,74	0,29	0,54	0,54	0,84	0,66	0,58	0,72	0,35

-0,90	Significant negative correlation (Pearson's $r < -0,8$)
-0,74	Significant negative correlation (Pearson's $r < -0,7$)
0,70	Significant positive correlation (Pearson's $r > 0,7$)
0,96	Significant negative correlation (Pearson's $r > 0,8$)

Annexe 6. Spectrogrammes d'échantillons de 5 min A) non perturbés par les vagues et contenant des signaux de broutage du substrat par les poissons perroquets ; B) fortement perturbés par les vagues ; C) contenant des signaux de broutage du substrat et du tripode par les poissons perroquets ; D) contenant un exemple de vocalisation de poisson





Annexe 7. Variabilité des 6 indices écoacoustiques entre le 29 avril 2018 et le 4 février 2019. Les indices ont été calculés sur la donnée brute non nettoyée. Les phases de pleine lune (PL) sont indiquées. Les valeurs de SPL sont en dB_{rms} re $1\mu\text{Pa}$, les autres indices sont sans unité. La couleur du cartouche indique la température de l'eau telle qu'estimée par la NOAA

(https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/GIS/map_viewer/cpcgis.swf) pour chaque mois.

