



HAL
open science

Cartographie de la biophonie des écosystèmes côtiers

Julie Lossent, Cedric Gervaise, Lucia Di Iorio, Pierre Boissery

► **To cite this version:**

Julie Lossent, Cedric Gervaise, Lucia Di Iorio, Pierre Boissery. Cartographie de la biophonie des écosystèmes côtiers. *Traitement du Signal*, 2016, 33 (1), pp.131 - 151. 10.3166/TS.33.131-151 . hal-01666317

HAL Id: hal-01666317

<https://hal.science/hal-01666317>

Submitted on 29 Mar 2018

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

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

Cartographie de la biophonie des écosystèmes côtiers

Julie Lossent¹, Cédric Gervaise^{2,3}, Lucia Di Iorio², Pierre Boissery⁴

1. France Energies Marines

15, rue Johannes Kepler technopole Brest-Iroise, 29200 Brest, France

julie.lossent@france-energies-marines.org

2. Chaire Chorus, Fondation partenariale Grenoble INP

46, avenue Felix Viallet, 38031, Grenoble Cedex 1, France

cedric.gervaise@chorusacoustics.com

lucia.diiorio@chorusacoustics.com

3. GIPSA-lab, 11 Rue des Mathématiques, Domaine Universitaire

BP 46, 38402 Saint Martin d'Hères

4. Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse

Imm Le Noailles 62 La Cannebière, 13001 Marseille

Pierre.Boissery@eaurmc.fr

RESUME. 1922 segments de 10 secondes de mesures sonores ont été enregistrés dans une zone de 4 km² comprise entre le trait de côte et l'isobathe 50 m à la pointe de la Revelatta (Calvi, Corse). Nous caractérisons le paysage acoustique de cette zone complexe qui présente 4 habitats (roche, herbier, sable et coralligène) entrelacés. Le SPL calculé sur la bande biophonique [2 kHz, 40 kHz] est maximum sur la frange rocheuse et décroît vers le large en suivant la régression SPL (Sound pressure Level, dB re. 1μPa) = 147 – 14log₁₀(r) où r est la distance à la côte. Ce modèle de régression s'appuyant sur des considérations énergétiques uniquement laisse penser que les émissions sonores de la roche sont fortes et qu'elles se propagent vers les autres habitats dont les biophonies ne seraient que des captations de celle de la roche. Pour évaluer la validité de cette hypothèse, nous avons étudié la diversité des formes spectrales mesurées. Pour cela, nous avons calculé une analyse en composantes principales (ACP) des 2 millions de spectres collectés. Les deux premières valeurs propres de l'ACP résument plus de 50 % de la variabilité totale des spectres et 80 % de la variabilité de la forme des impulsions. Les scores 1 et 2 de l'ACP forment un nuage continu que nous avons segmenté en 4 familles en fonction du quadrant du plan {score 1, score 2} auquel ils appartiennent. Ces 4 familles définissent 3 signatures spectrales de la biophonie du site étudié (les signatures des quadrants 1 et 2 étant proches) : des impulsions présentant un maximum marqué vers 3 et 4 kHz, des impulsions présentant une bosse entre 5 et 12 kHz, des impulsions présentant un maximum haute fréquence au-delà de 20 kHz. Les 4 proportions des impulsions générées par un habitat dans les quatre quadrants du plan {score 1, score 2} de l'ACP sont proposées comme descripteur de la diversité des formes spectrales de la biophonie d'un habitat. À partir de ce quadruplet de descripteurs, nous avons pu affiner la description du paysage acoustique, bâti initialement sur des considérations énergétiques. Les signatures spectrales des 4 habitats sont constituées des mêmes quatre ingrédients mais dans des proportions différentes. Le coralligène possède une biophonie spécifique différente des autres habitats et cette biophonie est créée par des impulsions hautes fréquences émises au sein du coralligène. La roche présente une production sonore forte avec une grande proportion d'impulsions basses fréquences autour de 3 à 4 KHz. L'herbier et le sable ne produisent pas ou peu d'impulsions, l'herbier écoute la production sonore de la roche alors que le sable écoute celles de la roche et du coralligène.

ABSTRACT. 1922 10s-long snapshots of sounds have been measured in a small 4km² coastal area (depth from 0 m to 50 m) near the pointe of Revelatta, (Calvi, Corse). Our aim is to build the soundscape of this complex area hosting 4 interleaved habitats (rocks, seagrass, sand, coralligenous). Wide Band [2 kHz, 40 kHz] SPL is maximum at the rocks and decrease offshore with the regression law: SPL (dB re.1μPa) = 147 – 14log₁₀(r) with r the distance to the coastline. The range of detection of the biophony of the rocks extends from 1800m to 8300m. This regression law based on energetic criteria only allows to think that the biophony of the rocks is loud and propagates to the others habitats. We assess the diversity of the spectral shape of the biophony by computing the PCA of 2 million of measured spectra. The two first eigenvalues explain 50% of the spectral variability. The spectra and their scores 1 and 2 create a continuous cloud in {score 1, score 2} plan. Then, we propose to segment the data in 4 quadrants depending of the sign of score 1 and score 2 of the PCA. Each quadrant produces a family of spectral signatures (spectrum with high peak at 3 kHz and 4 KHz,

spectrum with wide bump between 5 kHz and 12 kHz, spectrum with maximum at high frequency more than 20 kHz). The 4 proportions of impulses from a given habitat in each of the 4 quadrants are proposed to describe the diversity of spectrum shape of this habitat. For our data base, each habitat hosted the four families of spectral signature but with different proportions. The coralligenous hosts its own sound production with high frequency impulses. The rocks host its own sound production with low frequency impulses. Seagrass habitats listen to the rocks and sand habitats listen to the rocks and the coralligenous.

MOTS-CLES : paysages acoustiques sous-marins, biophonie, habitats benthiques, analyse en composantes principales, monitoring par acoustique passive.

KEYWORDS: underwater soundscapes, biophony, benthic habitats, principal component analysis, passive acoustic monitoring.

DOI:10.3166/TS.33.131-151 © Lavoisier 2016

Extended abstract

From 7 days of seatrial in August 2014, 1922 10s-long snapshots of sounds have been measured with one acoustics drifting buoy and fixed acoustics moorings in a small 4km² coastal area (depth from 0 m to 50 m) near the pointe of Revelatta, Calvi, Corse (lat = 42°34'49.44''N, long = 8°43'27.15''E). Our aim is to build the soundscape of this complex area hosting 4 interleaved habitats (rocks, sea grass, sand, and coralligenous) and a well-conserved marine biodiversity and to assess if each habitat has its own biophony or if they share the same one. Wide Band SPL ([2 kHz, 40 kHz], bandwidth of biophony) is maximum at the rocks and decreases offshore with the regression law: SPL (dB re.1μPa) = 147 – 14log₁₀(r) with r the distance to the coastline. The range of detection of the biophony of the rocks (CFAR energy detector, Pfa = 10⁻⁴, ambient noise level equal to Wenz's model) extends from 1800 m to 8300 m depending on the wind speed. This regression law based on "energetic criteria only" allows to think that the biophony of the rocks is loud and propagates to the others habitats. We assess the diversity of the spectral shape of the biophony by computing the PCA of 2 million of the measured spectra. The two first eigenvalues explain 50% of the spectral variability (including variability due to the multi-path propagation and to the spectral shape of the emissions) and 80% of the spectral shape of the emissions. The spectra and their scores 1 and 2 create a continuous cloud in {score 1, score 2} plan without well distinct patches associated to a specific habitat. Then, we propose to segment the data in 4 quadrants depending on the sign of score 1 and score 2 of the PCA. Each quadrant produces a family of spectral signatures (spectrums with high peak at 3 kHz and 4 kHz, spectrums with wide bump between 5 and 12 kHz, spectrums with maximum at high frequency more than 20 kHz). The 4 proportions of the impulses from a given habitat in the 4 quadrants are proposed to describe the diversity of spectrum shape of this habitat. For our data base, each habitat hosted the 4 families of spectral signatures but with different proportions. The coralligenous hosts its own sound production with high frequency and weak impulses. The rocks host its own sound production with low frequency load impulses. Seagrass habitats "listen" to the rocks and sand habitats "listen" to the rocks and the coralligenous. For our studied area, to account for the spectral shapes of impulses from one habitat and their diversity allows to complement the blurred conclusions obtained using "SPL only considerations". We were able to distinguish the sound production of coralligenous that is weak compared to the sound production of rocks but differ from it by the spectral shape of its impulses.

1. Introduction

Le paysage acoustique d'un habitat sous-marin est défini comme la distribution spatiale et temporelle des sons créés ou se propageant dans cet habitat (Krause, 1987). Le paysage acoustique intègre trois composantes : la biophonie, la géophonie et l'anthropophonie (Pijanowski *et al.*, 2011). La biophonie rassemble les sons émis par la faune marine (invertébrés (Chitre *et al.*, 2012 ; Di Iorio *et al.*, 2012), poissons (Luczkovich *et al.*, 2008), mammifères marins (Au et Hastings, 2008)). La géophonie comprend les émissions sonores des phénomènes naturels abiotiques (agitation de surface due au vent, (Wenz, 1962), pluie (Nystuen, 1986), séismes sous-marins (Goslin *et al.*, 2004), bruit de la glace (Kinda *et al.*, 2013, 2015)). La dernière composante, l'anthropophonie, intègre l'ensemble des bruits générés par les activités humaines (Gervaise *et al.*, 2012). Les paysages acoustiques forment une empreinte de la structure, du fonctionnement et de l'évolution des écosystèmes marins. Grâce au développement récent d'enregistreurs acoustiques autonomes (Sousa-Lima *et al.*, 2013) possédant des durées d'autonomie importantes, cette empreinte peut être observée et analysée sur différentes échelles écologiques temporelles (cycles de marées, journaliers, lunaires, annuels) et spatiales (du bassin océanique de plusieurs millions de kilomètres carré à des échelles locales de quelques mètres carré).

À l'interface entre la terre et la mer, les milieux côtiers sont d'une importance majeure par les services écologiques qu'ils apportent (Costanza *et al.*, 1997). Ils présentent de grandes variabilités spatio-temporelles (Liu *et al.*, 2010), aussi l'étude des paysages acoustiques s'y fait sur de plus petites échelles spatiales (du kilomètre carré à la centaine de kilomètres carrés) en mettant en œuvre un protocole de cartographie où un hydrophone est déplacé sur un nombre significatif de points couvrant toute la zone d'étude. L'objectif étant de décrire la variabilité spatiale du paysage acoustique et d'en trouver les causes. Sur une zone côtière australienne d'environ 500 km², Radford *et al.* (2010) montrent que des habitats très différents (roche, sable, récifs à couverture algale) émettent des paysages acoustiques différents. Sur

une surface équivalente, dans le golfe de Panama, Kennedy *et al.*, (2010) montrent que le paysage acoustique des récifs coralliens est très différent de la signature acoustique des fonds sableux entourant les récifs. Ce paysage acoustique des récifs coralliens évolue spatialement en corrélation avec les variations des communautés de poissons hébergées par les récifs. Dans un estuaire de la Caroline du Nord, Lillis *et al.* (2014a) identifient, à l'échelle du kilomètre carré, la différence significative entre la production sonore d'un récif huitrier et celle des fonds meubles entourant le récif. Radford *et al.* (2010), Kennedy *et al.* (2010) et Lillis *et al.* (2014b) indiquent que les différences marquées entre les signatures acoustiques faibles des fonds meubles et les signatures acoustiques fortes des récifs ou des substrats rocheux sont utilisées par les larves de poissons et d'invertébrés pour choisir par discrimination acoustique les meilleurs sites de fixation ou de colonisation. Ces différences sonores sont établies entre deux zones homogènes proches mais très contrastées. Mc Williams et Hawkins (2013) s'intéressent au paysage acoustique d'une petite baie (~ 0,5 km²) dans laquelle 3 types d'habitats différents (vase, gravier, roche) sont finement entrelacés. Ici, une ressemblance entre les signatures acoustiques des trois habitats est constatée, la production sonore de la roche, plus forte, se propage vers les autres habitats et masque leur production sonore spécifique si elle existe.

Pour décrire les signatures sonores des habitats échantillonnés, les travaux précédents se sont focalisés sur la biophonie, qui, dans les cas étudiés, prend principalement la forme d'impulsions puissantes et large bande (de 3 kHz à plus de 50 kHz). Les données sont analysées en calculant une collection de spectres acoustiques (dB re.1μPa²/Hz) et de niveaux sonores large bande (dB re.1μPa). Les distributions statistiques des niveaux sonores sont construites et les différences entre distributions sont quantifiées par des tests statistiques. Les différences entre les formes des spectres sont constatées qualitativement. Dans la présente contribution, nous reprenons cette approche en se focalisant sur les fréquences supérieures à 2 kHz qui rassemblent principalement les sons émis par les invertébrés marins.

Notre site atelier est la pointe de la Revelatta, Calvi, Corse, reconnue pour héberger une biodiversité marine riche répartie sur 4 types d'habitats entrelacés (roche, herbier, sable, coralligène) dans une aire très resserrée (~4 km², 2 x 2 kms). À partir d'un échantillonnage acoustique réalisé avec une bouée dérivante, 44 points de mesure répartis sur les différentes biocénoses ont été réalisés.

Les deux questions jointes que nous abordons dans le présent papier sont 1) d'établir s'il y a une signature acoustique spécifique à chaque type d'habitat et 2) de proposer des descripteurs acoustiques mettant en avant ces spécificités si elles existent. Pour cela, une première partie présente le site d'étude, l'instrumentation acoustique utilisée et le protocole d'échantillonnage réalisé. Dans une deuxième partie, grâce à un examen du spectrogramme des mesures, la bande passante de la biophonie émise par les invertébrés benthiques est identifiée et le niveau sonore large bande de 2 kHz à 40 kHz est évalué. L'hypothèse que la roche produit une biophonie puissante capable d'insonifier les 3 autres habitats est investiguée. Nous montrons qu'en termes énergétique, la biophonie de la roche peut insonifier l'intégralité de la zone d'étude. Dans une troisième partie, nous raffinons la description de la biophonie en considérant son spectre en densité spectrale de puissance. Une analyse en composante principale (ACP) de la collection des spectres mesurés montre que les deux premières composantes capturent 50 % de la variabilité de la base de données et 80 % de la variabilité des impulsions. L'étude de la distribution des deux premiers scores en fonction du type d'habitat est réalisée. Nous étudions comment les deux premiers scores de l'ACP et plus particulièrement la proportion de ces scores dans les 4 quadrants du plan des 2 premières composantes de l'ACP permet d'identifier automatiquement le type de biocénose où sont réalisées les mesures. Une dernière partie rappelle les conclusions principales de nos travaux.

2. Matériel expérimental et préparation des données

Une campagne de cartographie acoustique passive SEACOUSTIC 2014 a eu lieu du 3 au 9 Août 2014 sur le site atelier de la Pointe de la Revelatta, Calvi, Corse, France (lat. = 42°34'49.44''N, long. = 8°43'27.15''E). La station océanographique Stareso et son programme de recherche Starecapmed ont servi de support scientifique et technique à la réalisation de la campagne. Sur une surface approximative de 4 km² à la bathymétrie comprise entre 5 et 50 mètres, le site héberge une mosaïque de 4 habitats (roche, herbier, sable, coralligène) entrelacés à très petite échelle spatiale (*cf.* figure 1). Le site atelier est en bon état écologique et constitue à ce titre une référence. Cependant des enjeux forts de conservation existent. L'herbier à *Posidonia oceanica* qui occupe plus de 75 % de l'aire d'étude est protégé par les conventions de Berne et de Barcelone, mais il voit sa surface régresser bien qu'il possède un statut écologique de bon à très bon (Lejeune *et al.*, 2013). Le site héberge une biodiversité riche évaluée en bon état par des indices qui sont toutefois en baisse ces dernières années (indices LIMA, FAST, (Gobert *et al.*, 2014 ; Seytre et Francour, 2009)). Le site subit une forte pression humaine durant la saison estivale avec de nombreux ancrages et plus de 150 plongées récréatives quotidiennes. Stareso nous a fourni les données d'environnement pertinentes pour l'interprétation des mesures acoustiques (profil CTD, vent, carte bathymétrique et carte des habitats). Lors de la campagne, le vent était limité et homogène sur la période (3 m.s⁻¹+/-1.9m.s⁻¹), la température de l'eau en surface était de 24,2°C+/- 0,4 °C et le profil de température, stable durant la période, présentait une thermocline à 50 mètres où la température est égale à 15,00 °C+/- 0,1°C, l'ensemble de nos mesures ayant été réalisées à une profondeur inférieure à celle de la thermocline, le profil de température est assumé

comme décroissant linéairement entre 24,2°C à la surface et 15°C à 40 mètres de profondeur. Ce profil estival induit une réfraction des ondes sonores vers le fond qui se fait sentir à partir d'une distance de propagation de l'ordre de 2 à 2,5 kms (simulation par lancer de rayon, code Bellhop). Nos mesures ayant été réalisées entre 20 mètres et 1,5 kms de la côte, cette réfraction subie ne nuit pas à la généralisation des résultats présentés.

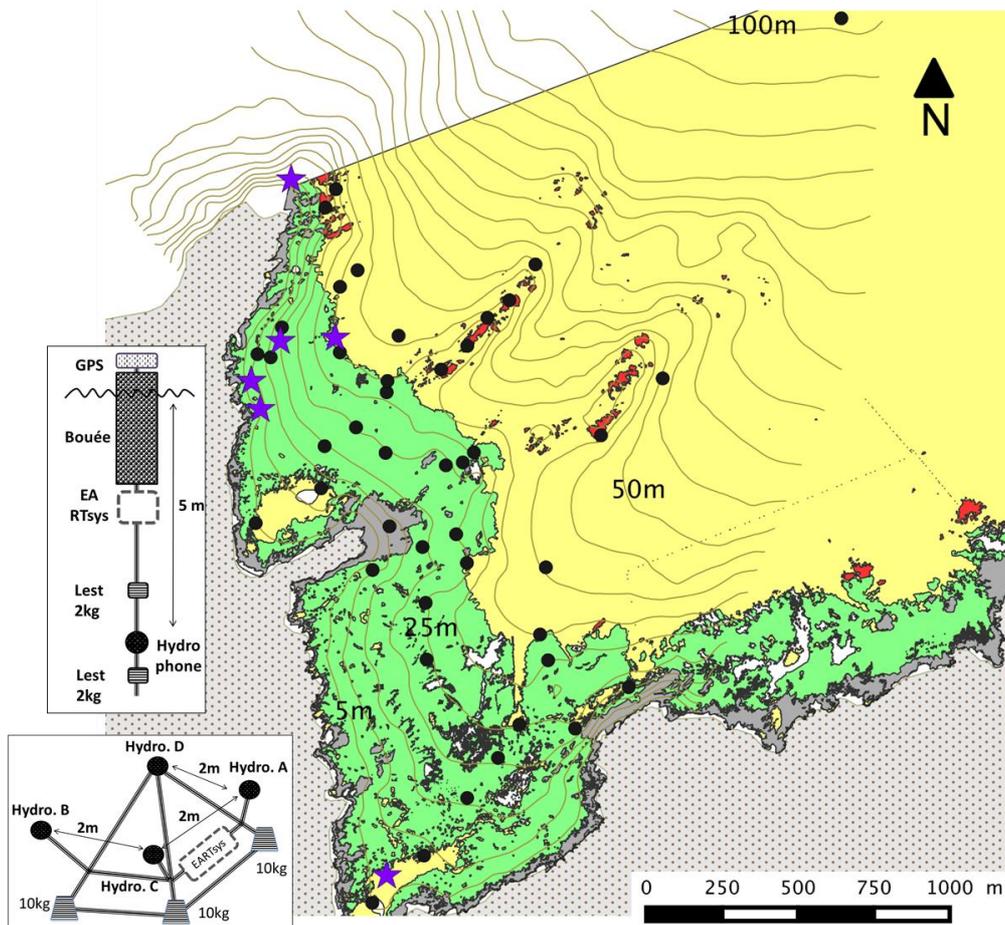


Figure 1. Carte du site de la pointe de la Revelatta ; En gris à pois : la côte ; habitats marins : en gris : roche, en vert : herbier, en jaune : sable, en rouge : coralligène ; échantillonnage acoustique : points noirs : 44 points de mesure ponctuels (20 minutes) réalisés par bouée dérivante, étoiles violettes : 6 points de mesure fixes (24 heures), en encadré à gauche : les deux systèmes de mesure utilisés, bouée dérivante en haut, système fixe en bas

La caractérisation acoustique du site a été réalisée avec deux types d'instrumentations complémentaires : une bouée dérivante portant un enregistreur acoustique et 1 hydrophone à 5 mètres de profondeur ; deux mouillages fixes posés sur le fond portant 4 hydrophones et un enregistreur autonome (cf. figure 1). Les enregistreurs acoustiques SDA14 de la société RTSYS étaient équipés d'hydrophones HTI92 WB (hydrophone omnidirectionnel, faible bruit, bande passante [5 Hz, 50 kHz]) de la société High Tech Inc. Les mesures avec cette chaîne calibrée s'effectuent à une fréquence d'échantillonnage de 156 kHz sur 24 bit entre -2.5 volts et +2.5 volts avec un gain de 14.7 dB et une sensibilité d'hydrophone égale -155 dB re.1Volt/1µPa+/- 2 dB. Le premier mouillage fixe a été positionné sur un site de référence pendant 7 jours alors que le second a été mis en place sur 5 positions pendant 24 heures (cf. figure 1). Pour les mesures avec la bouée dérivante, 44 positions (20 minutes de mesure par position) ont été choisies pour échantillonner les 4 types d'habitats (cf. figure 1 et tableau 1). Les mesures acoustiques ont été séparées en segments de 10 secondes de données. Pour chaque segment, la position de la bouée a été notée ainsi que le type d'habitat attribué parmi 4 choix : roche, herbier, sable ou coralligène. Grâce au logiciel d'information géographique QGIS, la distance entre la position de la bouée au centre du segment et la côte la plus proche a été calculée. Les données brutes au format wav ont été corrigées des paramètres de la chaîne d'acquisition pour fournir le signal acoustique en µPa. Un spectrogramme du segment de 10 secondes a été calculé et exprimé en densité spectrale de puissance $\gamma_{SPL}(f)$ (dB re.1µPa²/Hz) avec les paramètres suivants : LFFT = 2 048, Recouvrement 50 %, fenêtre de Hanning. Chaque segment de 10 secondes contient 1 524 spectres acoustiques. Pour chaque instant de calcul du spectrogramme le niveau large bande a été calculé en intégrant la densité spectrale sur la bande [2 kHz, 40 kHz].

Au final, la campagne fournit 1 922 segments de 10 secondes de mesure utilisables produisant au total une collection de 2 929 127 spectres de densité spectrale de puissance (dB re.1 μ Pa²/Hz) et autant de niveau large bande entre 2 kHz et 40 kHz (dB re.1 μ Pa) pour mener nos analyses.

Tableau 1. Synthèse de l'échantillonnage acoustique réalisé durant Seacoustic 2014

Habitat	Nombre de positions échantillonnées	Distance moyenne à la côte en m	Nombre de segments de mesure de 10 secondes	Nombre de spectres sélectionnés pour l'analyse
Roche	5	99,3	110	167 640
Herbier Nord	28	251,4	345	525 780
Sable Large	6	885,3	68	103 632
Coralligène	5	766	50	76 200
Points fixes	6	130	1349	2 055 876

Un examen visuel exhaustif des spectrogrammes des segments a été réalisé (cf. figure 2 pour des échantillons représentatifs). Tous les segments présentant du bruit rayonné par des embarcations motorisées ont été retirés de la base des données analysée. La bande fréquentielle comprise entre 2 et 40 kHz a été identifiée pour contenir la production sonore des invertébrés benthiques (impulsions) et ne pas inclure le bruit basse fréquence du trafic maritime ou les signaux de haute fréquence émis par les sonars. Le choix de cette bande de fréquence est cohérent avec celles identifiées par Cato et Bell (1992), Watanabe *et al.* (2002), Kennedy *et al.* (2010), Mc William et Hawkins (2013), Radford *et al.* (2010), Lillis *et al.* (2014a ; 2014b) sur des sites d'études similaires.).

Pour chaque segment de 10 secondes, les 1 524 niveaux large bande ont été organisés en centile et nous avons retenu par convention le 95^e centile de chaque segment de 10 secondes comme une estimation du niveau des impulsions sonores de la biophonie (IL, Impulse Level, dB re.1 μ Pa) et les niveaux compris entre le 25^e percentile et le 75^e centile comme des représentants du bruit ambiant pour chaque segment de 10 secondes (ANL, Ambient Noise Level, dB re.1 μ Pa).

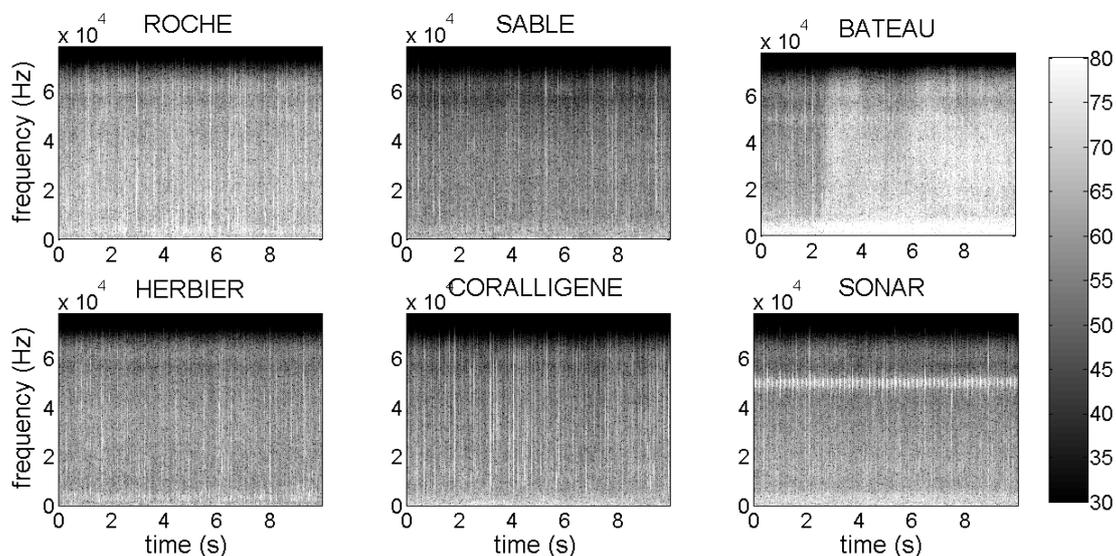


Figure 2. Spectrogrammes typiques des mesures, en haut à gauche : roche, en haut au milieu sable, en haut à droite présence d'un bateau moteur allumé, en bas à gauche herbier, en bas au milieu coralligène, en bas à droite bateau avec sondeur allumé et moteur éteint

3. Analyses à partir des niveaux « large bande » SPL dans la bande [2 - 40 kHz]

Le tableau 2 reporte la distribution statistique du niveau SPL dB re.1 μ Pa dans la bande [2 kHz, 40 kHz] en fonction du type d'habitat où ont été réalisées les mesures. La valeur moyenne de la différence entre les mesures réalisées à la dérive et les mesures au point fixe est égale à 1,6 dB. Cette différence est faible, ce qui tend à prouver que le bruit hydrodynamique de la bouée en dérive reste faible et ne vient pas polluer la mesure. La dispersion du SPL au sein de

chaque biocénose est relativement homogène, l'écart moyen entre le 95^e et le 5^e centile est de 8 dB +/- 2,3 dB. La dispersion est maximale pour la roche et minimale pour le sable. L'habitat « roche » présente un niveau sonore médian élevé (125 dB) bien supérieur (au moins 12 dB) à celui des herbiers qui lui est supérieur de 6 dB aux niveaux sonores du coralligène et du sable. Nos résultats sont conformes à ceux des références bibliographiques antérieures (McWilliams et Hawkins (2013), Lillis *et al* (2014a)) qui identifient clairement les habitats rocheux comme des habitats très bruyants dont la production sonore se propage vers les autres habitats. Pour affiner cette analyse sur nos données, nous traçons IL en fonction de la distance « r » à l'habitat rocheux le plus proche (*cf.* figure 3). Pour notre site, les habitats rocheux sont concentrés sur la frange littorale, nous avons donc approximé la distance à la roche la plus proche par la distance à la côte.

Tableau 2. Distribution statistique des niveaux sonores large bande SPL dB re.1μPa dans la bande de la biophonie [2 kHz, 40 kHz], ici l'ensemble des niveaux sonores relatifs à un habitat ont été rassemblés puis les centiles ont été estimés

	5 ^e	25 ^e	50 ^e	75 ^e	95 ^e	Moyenne	Ecart type
Roche (dérive)	119,25	121,23	123,02	125,41	130,16	123,62	+/-3,4
Herbiers (dérive)	108,77	110,25	111,57	113,36	117,36	112,11	+/-2,78
Sable (dérive)	104,49	105,61	106,47	107,50	109,48	106,67	+/-1,66
Coralligènes (dérive)	105,10	106,25	107,25	108,75	113,05	107,89	+/-2,73
Roche (fixe)	112,1	115,62	119,46	122,95	129,98	119,82	+/- 5,58
Herbiers (fixe)	111,18	112,85	114,31	116,09	119,58	114,69	+/-2,61

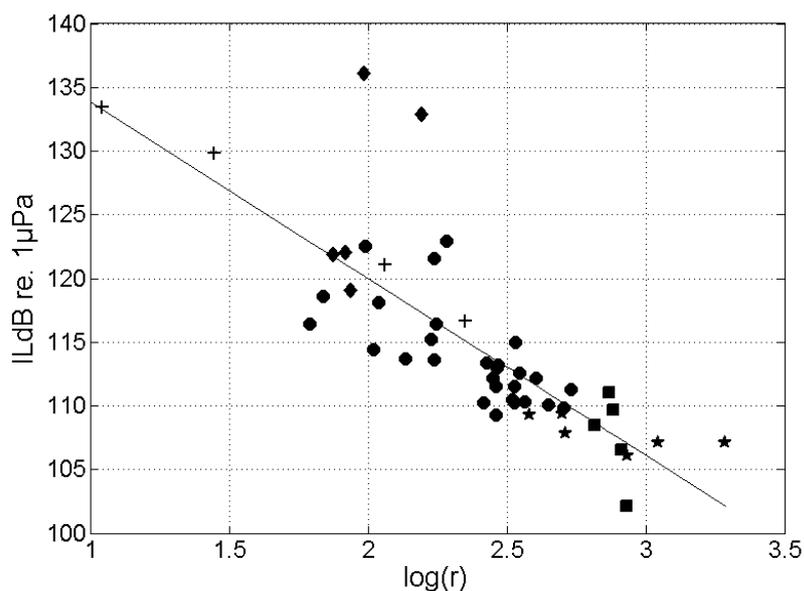


Figure 3. Niveau sonore IL large bande [2 kHz, 40 kHz] dB re.1μPa en fonction du logarithme en base 10 de la distance « r » entre la position de mesure, (N = 44) et la côte la plus proche. Losange : roche, rond : herbier, étoile : sable, carré : coralligène, croix : point fixe. Droite : meilleure régression linéaire

Les niveaux sonores décroissent avec la distance à la côte, les données sont bien représentées par une approximation linéaire qui capture 55 % de la variance et est significative (P-value = 10⁻⁹) :

$$SPL(r) = 147 - 14 \log_{10}(r) \text{ (dB re. } 1 \mu\text{Pa)}. \quad (1)$$

L'abscisse à l'origine égale à 147 dB représente le niveau à 1 mètre d'une source équivalente, c'est-à-dire la production sonore de la frange rocheuse le long de la côte. Une méthode de régression similaire a été utilisée par Lillis *et al.* (2014a). Elle relate des niveaux de source compris en 127 dB et 136 dB. Le site atelier de Lillis *et al.* (2014a) est un récif huitrier isolé au sein d'une large surface de sédiments meubles. On peut suspecter que la diversité des espèces présentes est moins importante que celle de notre site. Les niveaux à la source que nous observons sont compatibles avec des émissions de crevettes claqueuses (Coquereau *et al.*, 2015 ; Ferguson and Cleary, 2001).

Le terme $-14\log_{10}(r)$ est le terme de perte de transmission mesuré empiriquement sur le site d'étude. D'après Urick (1983), les coefficients de régression linéaire de perte de transmission sont compris entre -10 (pertes cylindriques) et -20 (pertes sphériques). Notre site d'essai présente une bathymétrie croissante vers le large tout en conservant un effet de guide d'onde, il favorise un régime de perte de propagation mixte.

Le constat que nos données, résumées par leur niveau large bande, collent dans leur ensemble à une régression linéaire représentant une source sonore (la biophonie de la roche) et sa propagation ($-14 \log(r)$) est compatible avec l'hypothèse que la frange rocheuse est le principal contributeur de la biophonie qui insonifie les autres habitats (herbier, sable et coralligène). Le rayon médian de l'empreinte acoustique de la biophonie de la roche est 3680 mètres (obtenu en comparant le niveau sonore propagé (cf. équation (1)) avec le niveau de bruit du modèle de Wenz pour la vitesse de vent médiane sur le site d'étude).

4. Analyses à partir des spectres bande étroite $\gamma_{SPL}(f)$ dB re. $1\mu Pa^2/Hz$

Dans cette partie, les données ne sont plus résumées par leur simple niveau sonore dans la bande [2 kHz, 40 kHz] mais sont décrites par leur densité spectrale de puissance. Nous allons montrer que cette représentation améliorée permet 1) de mettre en avant des différences significatives entre habitats notamment avec la roche, et 2) de proposer des descripteurs acoustiques permettant de quantifier ces différences.

4.1. Approche qualitative

Dans une première analyse, qualitative, nous créons 4 classes de spectres en fonction des habitats où ils ont été mesurés. Pour chaque classe, nous calculons la distribution de probabilité des spectres ainsi que le spectre médian et le 95° centile des spectres. Ces spectres sont corrigés de leur tendance linéaire pour soustraire la contribution due à l'agitation océanique et mettre en avant les contributions de la biophonie.

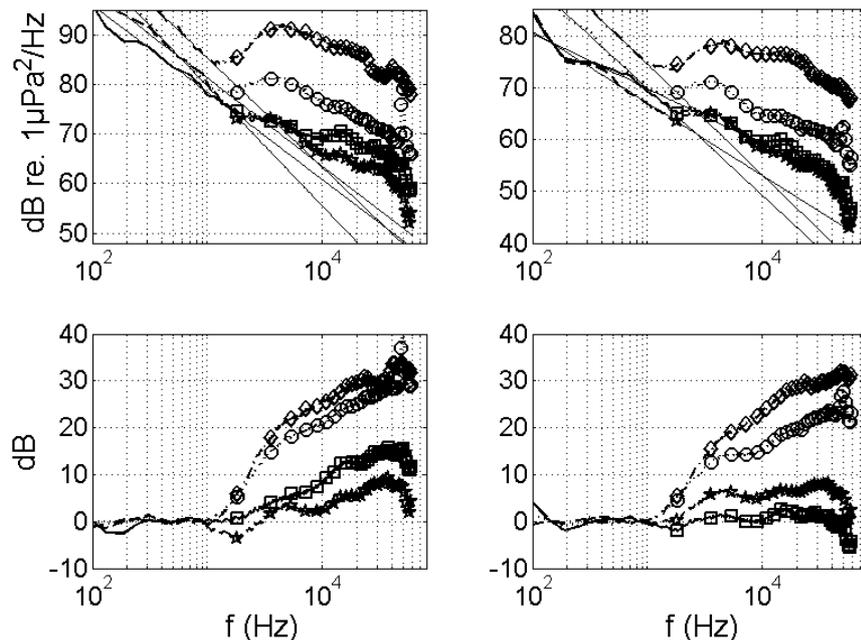


Figure 4. 95° centile (à gauche) et médiane (à droite) des spectres acoustiques en fonction du type d'habitat (losange : roche, rond : herbier, carré : coralligène, étoile : sable). En a) et b) les spectres bruts, les lignes noires sont les régressions linéaires extrapolant les niveaux sonores du bruit de l'agitation de surface, En c) et d) les spectres corrigés de la tendance linéaire afin de mettre en avant la contribution de la biophonie

À partir de 1 kHz, les niveaux spectraux mesurés s'écartent de l'extrapolation linéaire des niveaux spectraux bâtie sur les basses fréquences. Ainsi à partir de 1 kHz, le bruit n'est pas uniquement du bruit d'agitation de la surface mais intègre une composante biophonique visible sous la forme de bosses spectrales. Ces bosses existent sur le 95° centile suggérant l'existence d'impulsions fortes (clairement visibles sur les spectrogrammes des données, cf. figure 2) mais aussi sur le

spectre médian suggérant l'existence d'un chorus acoustique constitué d'une myriade d'impulsions biophoniques lointaines.

L'étagement des spectres acoustiques en fonction du type d'habitat reflète l'étagement des niveaux large bande, l'habitat « roche » est plus bruyant que l'habitat « herbier » qui est plus bruyant que les habitats « sable » et « coralligène ». Alors que les différences des niveaux des bosses spectrales sont très marquées, il est délicat à partir d'un examen visuel des spectres de statuer sur l'existence d'une différence de forme des bosses spectrales entre les différents habitats. L'approche reste qualitative et nos résultats sont toujours compatibles avec l'hypothèse d'une biophonie rocheuse forte qui insonifie les autres habitats.

4.2. Approche quantitative

Les analyses effectuées précédemment ont principalement exploité le niveau des sons qu'il soit large bande ou spectral (approche par centile). Afin de décrire et d'exploiter la diversité des formes spectrales, nous proposons d'utiliser une analyse en composantes principales (ACP) de nos spectres (Simard *et al.*, 2015).

Les spectres initiaux ont été calculés avec une longueur de FFT égale à 2048, afin de réduire la dimension des données spectrales initiales, la partie utile des spectres comprise entre 2 kHz et 40 kHz est extraite et lissée en appliquant un filtre moyenneur sur 32 canaux FFT. Le spectre lissé est alors sous-échantillonné avec un facteur 16 pour fournir un spectre défini sur 64 points entre 2 et 40 kHz. L'ACP est appliquée à l'intégralité des données (*i.e.* 2 929 127 spectres) centrées et réduites. Nous séparons notre base de données en 8 classes : les spectres des impulsions ($\gamma_{IL}(f)$) et les spectres du bruit ambiant ($\gamma_{ANL}(f)$) pour les habitats « roche », « herbier », « sable » et « coralligène ».

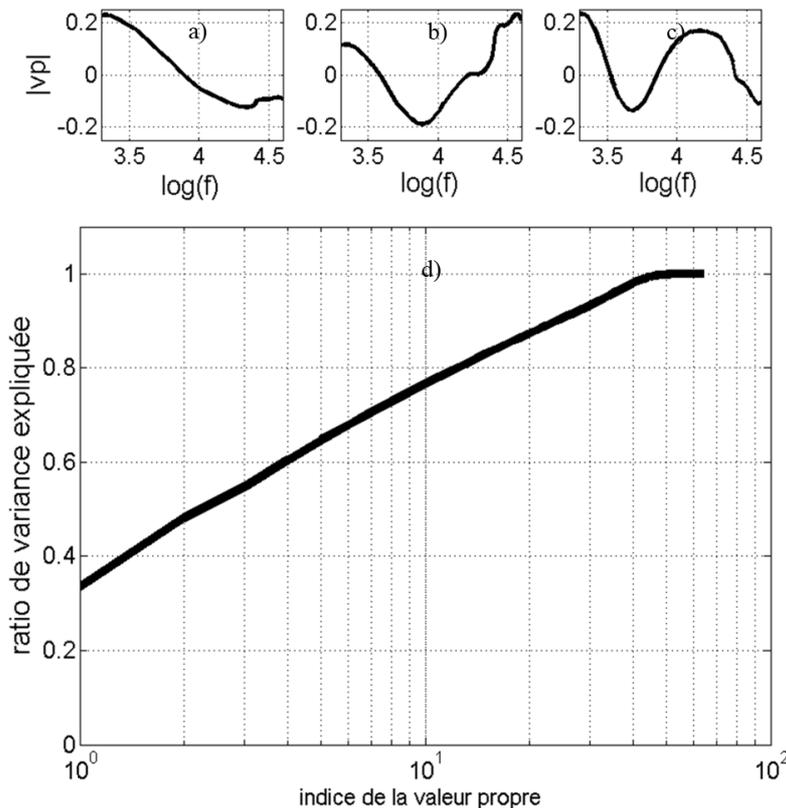


Figure 5. d) Pourcentage de variance expliquée en fonction du nombre de valeurs propres utilisées ; a), b), c) forme spectrale des trois premières composantes de l'ACP

4.2.1. Dimension de l'espace des spectres générés par la biophonie du site d'étude

Lorsque l'on considère la totalité de la base de données, les deux premières valeurs propres capturent 50 % de la variance des spectres, 4 valeurs propres en résument 60 % et 40 valeurs propres 98 %. Si l'on se concentre uniquement sur les impulsions (en ne considérant que les spectres compris entre le 95^e et le 100^e centile de chaque segment de 10 s), les deux premières valeurs propres capturent 80 % de la variance, 4 valeurs propres résument 92 % de la variance. Ainsi

un espace à deux dimensions, celui des scores des deux premières valeurs propres de l'ACP semble adéquat pour capturer et décrire la diversité des formes spectrales.

Réduire les données à un espace à 2 dimensions sans une perte considérable d'information permet de représenter graphiquement les données (*cf.* figure 6).

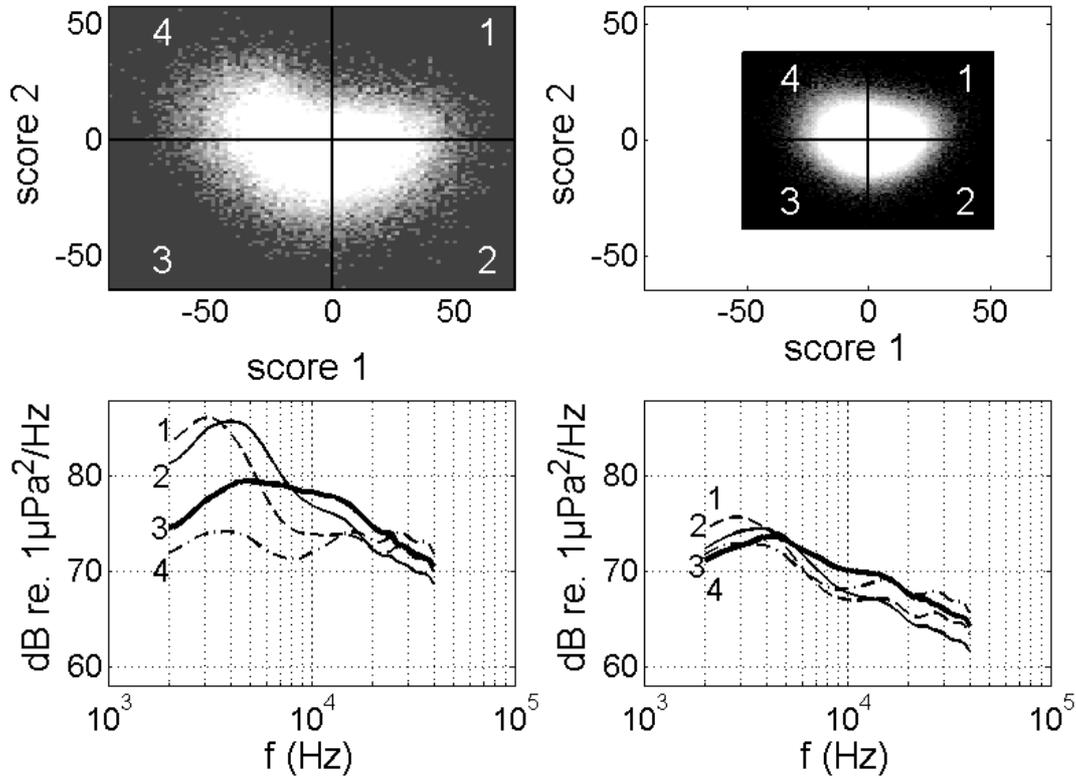


Figure 6. Distribution des scores de l'ACP sur l'ensemble de la base de données, en haut à gauche : distribution des scores ACP des impulsions, en bas à gauche : moyenne des spectres de toutes les impulsions appartenant à un même quadrant du plan (score 1, score 2), en haut à droite : distribution des scores ACP de l'ANL, en bas à droite : moyenne de tous les spectres ANL appartenant à un même quadrant du plan (score 1, score 2)

Les spectres des impulsions et du bruit ambiant forment un nuage continu dans le plan (score 1, score 2) sans patch isolé qui aurait pu être relié clairement à un habitat particulier. La partition du plan (score 1, score 2) en quatre quadrants (quadrant Q1 : score 1 > 0, score 2 > 0, quadrant Q2 : score 1 > 0, score 2 < 0, quadrant Q3 : score 1 < 0, score 2 < 0, quadrant Q4 : score 1 < 0, score 2 > 0) permet de définir quatre signatures spectrales de la forme des impulsions ou du bruit ambiant. Les signatures des impulsions issues des quadrants 1 et 2 sont des spectres présentant un maximum fort bien marqué entre 3 et 4 kHz. Ces spectres sont compatibles les spectres des émissions de crevettes claqueuses (Chitre *et al.*, 2012 ; Lillis *et al.*, 2014a ; McWilliam and Hawkins, 2013 ; Radford *et al.*, 2010). Les signatures des impulsions issues du quadrant Q3 présentent une bosse large comprise entre 5 kHz et 12 kHz alors que les impulsions issues du quadrant Q4 présentent une amplitude plus faible avec un maximum concentré sur les hautes fréquences. Les spectres du quadrant Q3 sont compatibles avec les spectres des émissions des oursins (Radford *et al.*, 2008). Les spectres du quadrant Q4 sont peu décrits par la communauté. Les formes spectrales des quadrants Q3 et Q4 sont compatibles avec certains spectres d'émissions de macrofaune benthique de peuplements du Maerl mesurés en aquarium (Coquereau *et al.*, 2015).

4.2.2. Distribution des 2 premiers scores de l'ACP en fonction de l'habitat sur lequel les mesures sont prises

Alors que la distribution des scores 1 et 2 est continue sans patch se détachant, il est intéressant d'observer les distributions des deux premiers scores de l'ACP des spectres provenant uniquement d'un habitat (*cf.* figure 7).

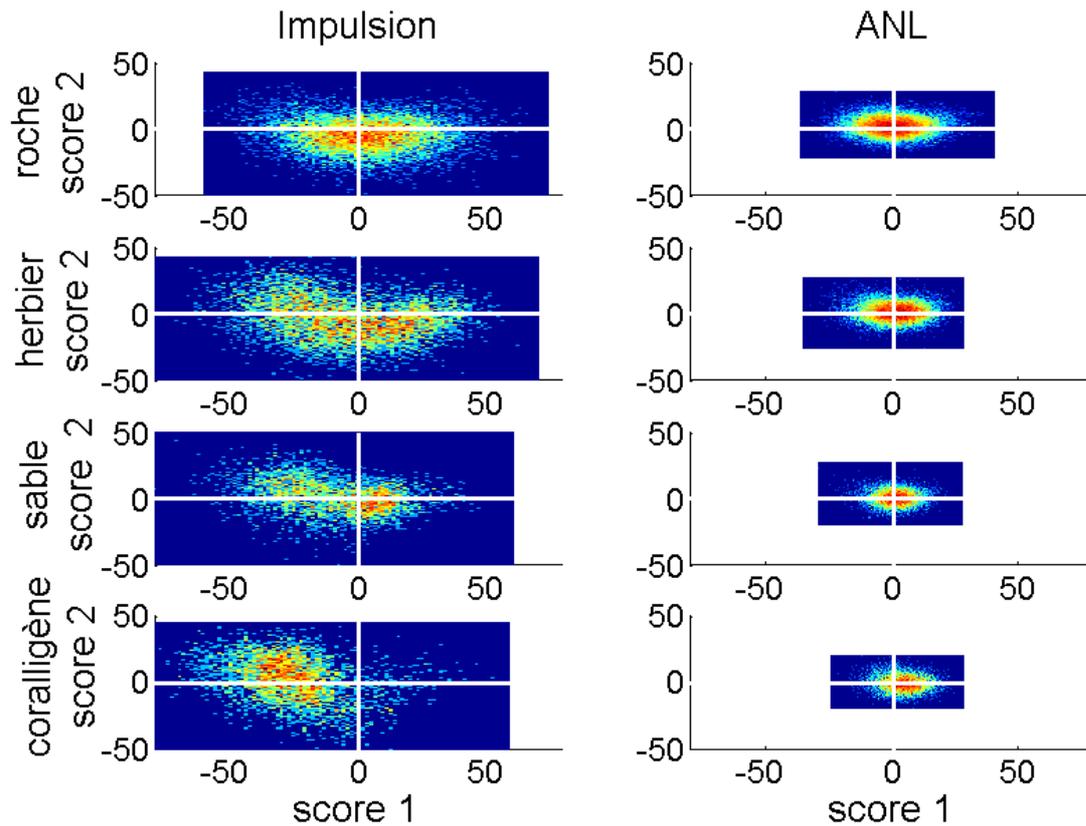


Figure 7. Distribution des scores 1 et 2 de l'ACP à gauche les impulsions, à droite le bruit ambiant, puis de haut en bas pour les habitats roche, herbier, sable et coralligène

Les distributions des scores 1 et 2 de l'ACP pour les impulsions montrent des différences entre habitats. Chaque habitat présente une distribution continue des scores mais avec une répartition différente des impulsions en fonction des quadrants dans le plan {score 1, score 2}. Les deux habitats qui diffèrent le plus dans leur répartition sont la roche et le coralligène alors que l'herbier et le sable présentent des distributions intermédiaires entre celles de la roche et du coralligène. Pour le bruit ambiant, les distributions des scores semblent plus homogènes entre les 4 quadrants pour un habitat donné et aussi entre les différents habitats, avec cependant une légère différence pour le bruit ambiant du coralligène dont la distribution est tirée vers les scores 1 positifs (quadrants Q1 et Q2).

4.2.3. Proposition d'un descripteur acoustique de la diversité de la biophonie

Afin de traduire quantitativement les constats faits à partir de la figure 7, nous proposons un descripteur pouvant évaluer la diversité de la biophonie et la relier à l'habitat sur lequel elle a été émise. Ce descripteur est un quadruplet $\theta = \{P1, P2, P3, P4\}$ composé des proportions des deux premiers scores de l'ACP où P1 est la proportion des couples {score 1, score 2} appartenant au quadrant 1 soit score1 > 0 et score 2 > 0, P2 est la proportion des couples {score 1, score 2} appartenant au quadrant 2 soit score1 > 0 et score 2 < 0, P3 est la proportion des couples {score 1, score 2} appartenant au quadrant 3 soit score 1 < 0 et score 2 < 0 et P4 est la proportion des couples {score 1, score 2} appartenant au quadrant 4 soit score 1 < 0 et score 2 > 0.

Le descripteur θ peut être évalué sur l'ensemble des données ou sur une partie des données comme le bruit ambiant ou les impulsions seulement.

Pour étudier l'intérêt de ce descripteur et sa capacité à discriminer acoustiquement les habitats, nous avons tout d'abord calculé la valeur du descripteur θ pour le bruit ambiant et les impulsions pour l'ensemble des données par type d'habitat (cf. tableau 4). Dans un second temps, pour évaluer si le descripteur θ pouvait servir à discriminer l'habitat sur lequel est mesurée la biophonie à partir d'une mesure acoustique courte (ici 10 secondes), nous avons utilisé la technique du bootstrap. Nous avons généré artificiellement 100 000 jeux de 1 524 spectres en tirant au sort ces 1 524 spectres dans l'ensemble des spectres mesurés pour un type d'habitat particulier. Ces 1 524 spectres représentent un segment de 10 secondes de données. Pour chaque segment, nous avons évalué θ . Pour l'ensemble des 100 000 réalisations, nous avons évalué la moyenne de θ et l'écart type des composantes de θ (cf. tableau 4).

Pour l'ensemble de la base de données et pour les impulsions, la biophonie de la roche et de l'herbier ont des distributions similaires avec approximativement 70 % des impulsions dans les quadrants 2 et 3. Les autres impulsions sont réparties uniformément dans les quadrants 1 et 2. Le coralligène se distingue des autres habitats en possédant peu d'impulsions dans le quadrant 1 et plus de 50% dans le quadrant 4. Le sable présente un quadruplet intermédiaire entre ceux de la roche et du coralligène.

Tableau 4. Distribution du descripteur $\theta = \{P_1, P_2, P_3, P_4\}$, évaluée pour les impulsions et le bruit ambiant, par type d'habitat pour la totalité de la base de données et pour 100 000 tirages de 10 secondes de données (μ : moyenne de θ et σ : écart type de θ)

IMPULSIONS								
	Roche		Herbier		Sable		Coralligène	
	Totalité de la base	100000 segments de 10 s.	Totalité de la base	100000 segments de 10 s.	Totalité de la base	100000 segments de 10 s.	Totalité de la base	100000 segments de 10 s.
Nb de spectres d'impulsions	15106	156 par 10s	33363	156 par 10s	5236	156 par 10s	3850	156 par 10s
P1	14,50%	$\mu = 14.5\%$ $\sigma = 8\%$	11,80%	$\mu = 11.7\%$ $\sigma = 4\%$	16,70%	$\mu = 16.6\%$ $\sigma = 15\%$	1,70%	$\mu = 1.7\%$ $\sigma = 9\%$
P2	36,90%	$\mu = 37\%$ $\sigma = 11\%$	28,90%	$\mu = 29\%$ $\sigma = 6\%$	31,00%	$\mu = 31\%$ $\sigma = 19\%$	3,30%	$\mu = 3.3\%$ $\sigma = 9\%$
P3	33,40%	$\mu = 33.4\%$ $\sigma = 10\%$	34,50%	$\mu = 34.4\%$ $\sigma = 7\%$	22,70%	$\mu = 22.7\%$ $\sigma = 17\%$	39,90%	$\mu = 39.9\%$ $\sigma = 24\%$
P4	15,10%	$\mu = 15.1\%$ $\sigma = 8\%$	24,90%	$\mu = 24.8\%$ $\sigma = 6\%$	29,60%	$\mu = 30\%$ $\sigma = 18\%$	55,00%	$\mu = 54.7\%$ $\sigma = 25\%$
ANL								
	Roche		Herbier		Sable		Coralligène	
	Totalité de la base	100000 segments de 10 s.	Totalité de la base	100000 segments de 10 s.	Totalité de la base	100000 segments de 10 s.	Totalité de la base	100000 segments de 10 s.
Nombre de spectres ANL	150374	780 par 10s	331317	780 par 10s	51884	780 par 10s	38150	780 par 10s
P1	24.4%	$\mu = 24.4\%$ $\sigma = 3\%$	26.7%	$\mu = 26.6\%$ $\sigma = 2\%$	27.4%	$\mu = 26.4\%$ $\sigma = 6\%$	27.6%	$\mu = 27.6\%$ $\sigma = 6\%$
P2	24%	$\mu = 24.0\%$ $\sigma = 3\%$	28.3%	$\mu = 27.2\%$ $\sigma = 2\%$	29.3%	$\mu = 28.2\%$ $\sigma = 5\%$	39.6%	$\mu = 39.5\%$ $\sigma = 6\%$
P3	24.6%	$\mu = 24.5\%$ $\sigma = 3\%$	21.2%	$\mu = 22.2\%$ $\sigma = 2\%$	21.5%	$\mu = 22.5\%$ $\sigma = 5\%$	14.4%	$\mu = 14.3\%$ $\sigma = 7\%$
P4	27.0%	$\mu = 27\%$ $\sigma = 3\%$	22.8%	$\mu = 23.3\%$ $\sigma = 2\%$	23.8%	$\mu = 22.8\%$ $\sigma = 5\%$	18.5%	$\mu = 18.4\%$ $\sigma = 5\%$

Pour l'ensemble de la base de données et pour le bruit ambiant, la biophonie de la roche possède une distribution très équilibrée entre les quatre quadrants, alors que les biophonies de l'herbier, du sable et du coralligène présentent plus de spectres dans les quadrants P1 et P2 (60 % à 70 %) que dans les quadrants P3 et P4.

Tableau 5. Valeur des vraisemblances que la biophonie d'un habitat donné décrite par $\theta = \{P1, P2, P3, P4\}$ évalué sur 10 secondes, relatif aux impulsions ou au bruit ambiant, soit représentable par les quadruplets d'un autre habitat, en gris les cas où il peut y avoir confusion entre deux biophonies générées par deux habitats différents

Impulsions					
		Habitat fournissant $\theta = \{P1, P2, P3, P4\}$			
		Roche	Herbier	Sable	Coralligène
Habitat auquel on attribue les mesures et les quadruplets $\{P1, P2, P3, P4\}$	Roche	0.22	0.18	0.389	10-4
	Herbier	0.20	0.22	0.75	2.10-4
	Sable	0.01	0.004	0.22	0.01
	Coralligène	5.10-5	5.10-5	0.01	0.22
ANL					
		Habitat fournissant $\theta = \{P1, P2, P3, P4\}$			
		Roche	Herbier	Sable	Coralligène
Habitat auquel on attribue les mesures et les quadruplets $\{P1, P2, P3, P4\}$	Roche	0.22	0.01	0.25	10-5
	Herbier	0.07	0.22	0.94	10-4
	Sable	0.01	0.008	0.22	0.02
	Coralligène	10-4	2.10-4	0.01	0.22

Les valeurs moyennes des composantes de θ obtenues par la technique du bootstrap sur des segments de 10 secondes de données sont égales (à 0.1% près) aux valeurs des composantes de θ calculées sur l'ensemble des données. Les écarts-types des composantes de θ sont supérieurs pour les impulsions en comparaison avec le bruit ambiant. Les écarts types les plus grands sont obtenus pour les habitats « sable » et « coralligène ». Afin d'évaluer la capacité « classifiante » du quadruplet $\theta = \{P_1, P_2, P_3, P_4\}$ pour identifier le type d'habitat à partir de 10 secondes de données, nous avons calculé la vraisemblance qu'un quadruplet issu d'un habitat donné soit représenté par un quadruplet d'un autre habitat. Pour cela, nous avons supposé des lois gaussiennes pour toutes les quantités (centrées sur la moyenne μ du tableau 4) et une indépendance des quantités P_1, P_2, P_3, P_4 entre elles (matrice de covariance diagonale avec pour termes diagonaux les carrés des écarts types du tableau 4). Le tableau 5 résume les résultats.

À partir des impulsions mesurées sur 10 secondes, i) la biophonie d'une roche pourra être attribuée à la biophonie d'une roche ou d'un herbier ; ii) la biophonie d'un herbier pourra être attribuée à la biophonie d'une roche ou d'un herbier ; iii) la biophonie d'un sable pourra être attribuée à la biophonie d'une roche ou d'un herbier ou d'un sable, iv) la biophonie du coralligène sera toujours attribuée à la biophonie d'un coralligène.

À partir du bruit ambiant mesuré sur 10 secondes, i) la biophonie d'une roche pourra être attribuée à la biophonie d'une roche avec une forte probabilité ou d'un herbier avec une faible probabilité ; ii) la biophonie d'un herbier sera toujours attribuée à la biophonie d'un herbier ; iii) la biophonie d'un sable pourra être attribuée à la biophonie d'une roche ou d'un herbier ou d'un sable, iv) la biophonie du coralligène sera toujours attribuée à la biophonie d'un coralligène.

Vu au travers du descripteur θ le sable est un habitat particulier puisque θ présente pour cet habitat la plus grande variabilité (cf. tableau 4) et il peut être confondu avec l'herbier et la roche. Nous pensons que, *in fine*, le sable n'héberge pas de faune sonifère et cet habitat ne fait que recevoir la production sonore de l'habitat sonifère le plus proche.

5. Conclusions

Nous nous sommes intéressés à la description et à la cartographie de la biophonie d'un site côtier. Le site de la pointe de la Revelatta, Corse, France, a été retenu pour sa complexité. En effet, sur une aire de 2 km x 2 km, il présente un entrelacs de 4 habitats bien différenciés, de la roche sur la frange littorale puis un herbier et ensuite un substrat sableux avec des affleurements rocheux colonisés par du coralligène. Après un examen des spectrogrammes des données, nous avons exclu les données polluées par le bruit anthropique et nous avons sélectionné les données contenant uniquement la biophonie concentrée sur la bande biophonique [2 kHz, 40 kHz].

L'étude du niveau sonore évalué sur la bande biophonique montre que la biophonie de la roche est la plus puissante et est susceptible d'insonifier l'ensemble de l'aire d'étude. Le rayon médian de l'empreinte acoustique de la roche est

3 680 m. Alors que le niveau sonore seul ne permet pas d'identifier avec certitude l'existence d'une biophonie spécifique à l'herbier, au sable et au coralligène, nous avons étudié la diversité des formes spectrales des biophonies de la zone étudiée. Pour cela, nous avons calculé l'ACP de l'ensemble des spectres mesurés. Les deux premières composantes de l'ACP résument 50 % de la variance de tous les spectres et 80 % de la variance des impulsions.

Nous avons utilisé les deux premiers scores de l'ACP comme un indice de la diversité spectrale de la biophonie. La distribution des deux premiers scores de l'ACP sur l'ensemble des données est continue sans patches apparents que l'on aurait pu attribuer à un habitat. L'étude de la distribution des deux premiers scores en fonction de l'habitat a montré que les habitats se différençaient par leurs proportions des scores dans les 4 quadrants du plan {score 1, score 2} et que l'on pouvait proposer le quadruplet des proportions des scores dans chacun des 4 quadrants comme un descripteur acoustique de la diversité spectrale de la biophonie. Ce descripteur permet l'identification de l'habitat ayant donné naissance à la biophonie.

À notre connaissance, nous sommes les premiers à relater l'usage de l'ACP pour l'analyse des formes de spectres de la biophonie des paysages acoustiques marins alors qu'elle est un outil classique dans le domaine de la chimie (Wagner and Castner, 2001) et la mécanique (Wu *et al.*, 1998) pour étudier des spectres, l'analyse de données de sondages (Pilowsky and Spence, 1975), l'analyse de spectrogrammes et d'images (Calder *et al.*, 2001 ; Pinkowski, 1997) et a été appliquée en acoustique sous-marine passive pour la classification des bateaux (Guan *et al.*, 2015, Simard *et al.*, 2015) et des bruits de glace (Kinda *et al.*, 2013, 2015). La proposition de découper le plan des deux premières composantes de l'ACP en 4 quadrants peut apparaître arbitraire et d'autres découpages pourraient être proposés (introduction d'une troisième valeur propre et description en 8 cubes, conservation des 2 premières valeurs propres mais fusion des quadrants 1 et 2 qui produisent une signature spectrale proche). Cependant ce choix a permis de démontrer l'intérêt de l'outil ACP et de la prise en compte d'un descripteur de la variabilité des formes spectrales émises dans un habitat donné pour cartographier un écosystème côtier.

Remerciements

Les auteurs remercient vivement l'Agence de l'Eau RMC pour le cofinancement du projet SEACOUSTIC 2014-2016, la STARESO et son personnel pour avoir accueilli, égayé et cofinancé la campagne SEACOUSTIC 2014, France Energies Marines et la région Bretagne pour le financement de la thèse de JL, la fondation partenariale Grenoble INP et les mécènes de la chaire CHORUS (Suez Environnement, Quiet-Océans, RTSYS, SERCEL, TBM Environnement, Terraseis) pour la bourse de recherche de LDI et CG.

Bibliographie

- Au W. W., and Hastings M. C. (2008). *Principles of marine bioacoustics*, Springer.
- Calder A. J., Burton A. M., Miller P., Young A. W., and Akamatsu S. (2001). A principal component analysis of facial expressions, *Vision Res.*, 41, 1179-1208.
- Cato D. H., and Bell M. J. (1992). *Ultrasonic Ambient Noise in Australian Shallow Waters at Frequencies up to 200 kHz*.
- Chitre M., Legg M., and Koay T.-B. (2012). *Snapping shrimp dominated natural soundscape in Singapore waters*, *Contrib Mar Sci*, 2012, 127-134.
- Coquereau L., Grall J., Chauvaud L., Gervaise C., Jolivet A., Clavier J., and Di Iorio L. (2015). Sound production and associated behaviors of benthic invertebrates from a coastal habitat in the north-east Atlantic, *Marine Biology*, Accepted.
- Costanza, R., d' Arge, R., Groot, R. de, Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., *et al.* (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital, *Nature*, 387, 253-260.
- Ferguson B. G., and Cleary J. L. (2001). In situ source level and source position estimates of biological transient signals produced by snapping shrimp in an underwater environment, *J. Acoust. Soc. Am.*, 109, 3031-3037.
- Gervaise C., Simard Y., Roy N., Kinda B., and Ménard N. (2012). Shipping noise in whale habitat: Characteristics, sources, budget, and impact on belugas in Saguenay–St Lawrence Marine Park hub, *J. Acoust. Soc. Am.*, 132, 76-89. doi:10.1121/1.4728190
- Gobert S., Chéry A., Volpon A., Pelaprat C., and Lejeune P. (2014). *The Seascapes as an Indicator of Environmental Interest and Quality of the Mediterranean Benthos: The in Situ Development of a Description Index: The LIMA*, *Underw. Seascapes*, Springer, p. 277–291.
- Goslin J., Perrot J., Royer J.-Y., Martin C., Dziak R.-P., Fowler M., Fox C., *et al.* (2004). Acoustic monitoring of the Mid-Atlantic Ridge North of the Azores : preliminary results of the SIRENA experiment, *InterRidge News*, 13, 9–13.
- Guan S., Lin T.-H., Chou L.-S., Vignola J., Judge J., and Turo D. (2015). Dynamics of soundscape in a shallow water marine environment: A study of the habitat of the Indo-Pacific humpback dolphin, *J. Acoust. Soc. Am.*, 137, 2939-2949.
- Di Iorio L., Gervaise C., Jaud V., Robson A. A., and Chauvaud L. (2012). Hydrophone detects cracking sounds: Non-intrusive monitoring of bivalve movement, *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 432, 9-16.

- Kennedy E., Holderied M., Mair J., Guzman H., and Simpson S. (2010). Spatial patterns in reef-generated noise relate to habitats and communities: evidence from a Panamanian case study, *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 395, 85-92.
- Kinda G. B., Simard Y., Gervaise C., Mars J. I., and Fortier L. (2013). Under-ice ambient noise in Eastern Beaufort Sea, Canadian Arctic, and its relation to environmental forcing, *J. Acoust. Soc. Am.*, 134, 77-87.
- Kinda G. B., Simard Y., Gervaise C., Mars J. I., & Fortier L. (2015). Arctic underwater noise transients from sea ice deformation: Characteristics, annual time series, and forcing in Beaufort Sea. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138(4), 2034-2045. <http://doi.org/10.1121/1.4929491>
- Krause B. (1987). *Bioacoustics: Habitat Ambience & Ecological Balance*, Whole Earth Review.
- Lejeune P., Abadie A., Binard M., Biondo R., and Borges A. (2013). *STARE-CAPMED (Station of Reference and rEsearch on Change of local and global Anthropogenic Pressures on Mediterranean Ecosystems Drifts): Rapport d'activité - Année 2013* (Rapport de recherche), STARESO, p. 147.
- Lillis A., Eggleston D. B., and Bohnenstiehl D. (2014a). Estuarine soundscapes: distinct acoustic characteristics of oyster reefs compared to soft-bottom habitat, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 505, 1–17.
- Lillis A., Eggleston D. B., and Bohnenstiehl D. R. (2014b). Soundscape variation from a larval perspective: the case for habitat-associated sound as a settlement cue for weakly swimming estuarine larvae, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 509, 57–70.
- Liu K.-K., Atkinson L., Quiñones R. A., and Talaue-McManus L. (2010). *Biogeochemistry of Continental Margins in a Global Context*, In P. K.-K. Liu, P. L. Atkinson, P. R. Quiñones, and D. L. Talaue-McManus (Eds.), Carbon Nutr. Fluxes Cont. Margins, Global Change – The IGBP Series, Springer Berlin Heidelberg, p. 3-24.
- Luczkovich J. J., Mann D. A., and Rountree R. A. (2008). Passive Acoustics as a Tool in Fisheries Science, *Trans. Am. Fish. Soc.*, 137, 533–541. doi:10.1577/T06-258.1
- McWilliam J. N., and Hawkins A. D. (2013). A comparison of inshore marine soundscapes, *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 446, 166-176.
- Nystuen J. A. (1986). Rainfall measurements using underwater ambient noise, *J. Acoust. Soc. Am.*, 79, 972-982. doi:10.1121/1.393695
- Pijanowski B. C., Villanueva-Rivera L. J., Dumyahn S. L., Farina A., Krause B. L., Napolitano B. M., Gage S. H., et al. (2011). Soundscape ecology: the science of sound in the landscape, *BioScience*, 61, 203–216.
- Pilowsky I., and Spence N. (1975). Patterns of illness behaviour in patients with intractable pain, *J. Psychosom. Res.*, 19, 279-287.
- Pinkowski B. (1997). Principal component analysis of speech spectrogram images, *Pattern Recognit.*, 30, 777–787. doi:10.1016/S0031-3203(96)00103-3
- Radford C., Jeffs A., Tindle C., and Montgomery J. C. (2008). Resonating sea urchin skeletons create coastal choruses, *Mar Ecol Prog Ser*, 362, 37-43.
- Radford C., Stanley J., Tindle C., Montgomery J., and Jeffs A. (2010). Localised coastal habitats have distinct underwater sound signatures, *Mar Ecol Prog Ser*, 401, 21-29.
- Seytre C., and Francour P. (2009). The Cap Roux MPA (Saint-Raphaël, French Mediterranean): changes in fish assemblages within four years of protection, *ICES J. Mar. Sci. J. Cons.*, 66, 180-187.
- Simard Y., Roy N., Gervaise C., & Giard S. (2015). Analysis and modeling of 255 ship source levels from an acoustic observatory along St. Lawrence Seaway. *J Acoust Soc Am*, in press.
- Sousa-Lima R. S., Fernandes D. P., Norris T. F., and Oswald J. N. (2013). A review and inventory of fixed autonomous recorders for passive acoustic monitoring of marine mammals: 2013 state-of-the-industry. *Acoust. Underw. Geosci. Symp. RIO Acoust. 2013 IEEE/OES*, 1–9. Presented at the Acoustics in Underwater Geosciences Symposium (RIO Acoustics), 2013 IEEE/OES. doi:10.1109/RIOAcoustics.2013.6683984
- Urick J. R. (1983). *Principles of underwater sound*, N. Y. McGraw-Hill Book Co.
- Wagner M., and Castner D. G. (2001). Characterization of adsorbed protein films by time-of-flight secondary ion mass spectrometry with principal component analysis, *Langmuir*, 17, 4649-4660.
- Watanabe M., Sekine M., Hamada E., Ukita M., and Imai T. (2002). Monitoring of shallow sea environment by using snapping shrimps, *Water Sci. Technol.*, 46, 419-424.
- Wenz G. M. (1962). Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources, *J. Acoust. Soc. Am.*, 34, 1936-1956.
- Wu H., Siegel M., and Khosla P. (1998). Vehicle sound signature recognition by frequency vector principal component analysis, *Instrum. Meas. Technol. Conf. 1998 IMTC98 Proc. IEEE*, 429-434.

Article soumis le 27/05/2015

Accepté le 18/12/2015

Traitement du signal Volume 33 – n° 1/2016, 131-151

DOI:10.3166/TS.33.131-151 © Lavoisier 2016