



HAL
open science

Production acoustique d'une flottille côtière : Application au suivi environnemental et à l'identification automatisée de sources sonores anthropiques

Caroline Magnier

► To cite this version:

Caroline Magnier. Production acoustique d'une flottille côtière : Application au suivi environnemental et à l'identification automatisée de sources sonores anthropiques. Acoustique [physics.class-ph]. Université Grenoble Alpes, 2018. Français. NNT : 2018GREAU040 . tel-02017556

HAL Id: tel-02017556

<https://theses.hal.science/tel-02017556>

Submitted on 13 Feb 2019

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

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



THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE LA COMMUNAUTÉ UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

Spécialité : Océan, Atmosphère, Hydrologie (CEOAH)

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

Caroline MAGNIER

Thèse dirigée par **Cédric GERVAISE**, ENSEIGNANT
CHERCHEUR, CNRS

préparée au sein du **Laboratoire Grenoble Images Parole Signal
Automatique**
dans l'**École Doctorale Terre, Univers, Environnement**

**Production acoustique d'une flottille côtière :
Application au suivi environnemental et à
l'identification automatisée de sources
sonores anthropiques**

**Acoustic Production of a Coastal Fleet:
Application to Environmental Monitoring and
Automated Identification of Anthropogenic
Sound Sources**

Thèse soutenue publiquement le **13 décembre 2018**,
devant le jury composé de :

Monsieur RONAN FABLET

PROFESSEUR, IMT ATLANTIQUE BRETAGNE-PAYS DE LA LOIRE,
Rapporteur

Monsieur BENOIT ZERR

MAITRE DE CONFERENCES, ENSTA BRETAGNE, Rapporteur

Madame CLAIRE NOEL

INGENIEUR DE RECHERCHE, SEMANTIC TECHNIQUE DES
SIGNAUX - SANARY, Examineur

Monsieur RENE GARELLO

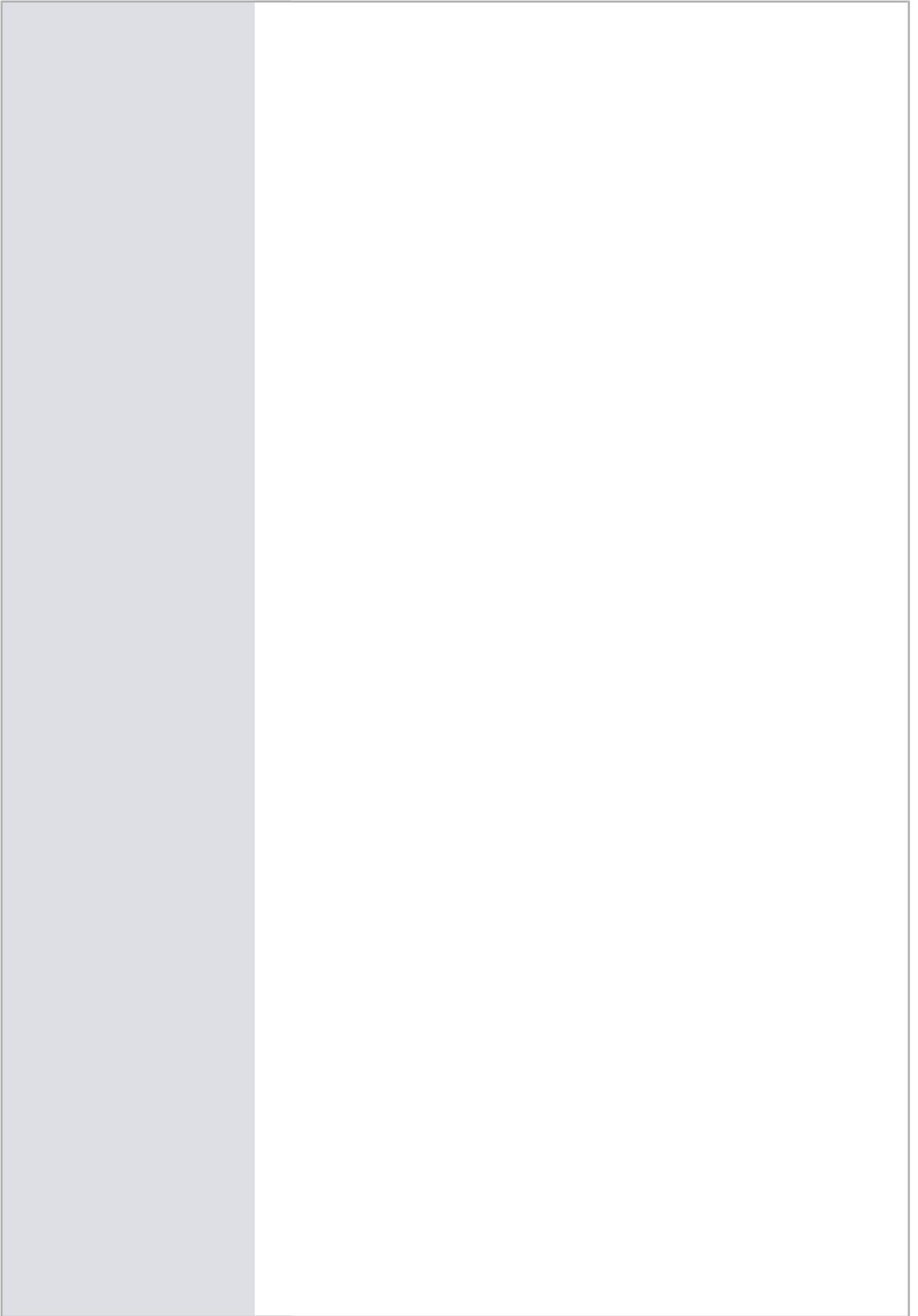
PROFESSEUR, IMT ATLANTIQUE BRETAGNE-PAYS DE LA LOIRE,
Examineur

Monsieur JEROME MARS

PROFESSEUR, GRENOBLE INP, Président

Monsieur YANN STEPHAN

INGENIEUR DE RECHERCHE, SHOM - BREST, Examineur



UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES
ÉCOLE DOCTORALE TUE
Terre – Univers – Environnement

THÈSE

pour obtenir le titre de

Docteur en Sciences

de l'Université Grenoble Alpes

Mention : OCEAN, ATMOSPHERE, HYDROLOGIE

Présentée et soutenue par

Caroline MAGNIER

**Production acoustique d'une flottille côtière :
Application au suivi environnemental et à
l'identification automatisée de sources sonores
anthropiques**

Thèse dirigée par Cédric Gervaise

Co-encadrée par Raphael Bourdon

préparée au laboratoire Grenoble Images Parole Signal
Automatique (GIPSA-Lab)

soutenue le 13 Décembre 2018

Jury :

<i>Rapporteurs :</i>	M. Benoit Zerr	- Lab-STICC, ENSTA Bretagne
	M. Ronan Fablet	- Lab-STICC, IMT Atlantique
<i>Président du jury :</i>	M. Jérôme Mars	- GIPSA-LAB, Grenoble INP
<i>Examineurs :</i>	Mme. Claire Noel	- SEMANTIC T.S.
	M. René Garello	- Lab-STICC, IMT Atlantique
	M. Yann Stéphan	- Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
<i>Directeur :</i>	M. Cédric Gervaise	- Institut de recherche CHORUS
<i>Co-directeur :</i>	M. Raphael Bourdon	- RTsys

A mon conjoint Rémi,

Remerciement

D'abord, je souhaiterais remercier mes deux directeurs de thèse. Cédric, je tenais à te remercier pour tout ce que tu m'as apporté sur le plan scientifique, de par tes remarques et conseils très judicieux et les échanges toujours pertinents ainsi pour ce que tu m'as appris sur un plan personnel et humain. Je te remercie aussi pour le temps que tu as passé à mes côtés et de m'avoir donné la chance de réaliser cette thèse.

Je voudrais aussi remercier les membres de mon jury de m'avoir fait l'honneur d'accepter d'être rapporteurs ou examinateurs de mes travaux. Merci pour le temps passé et le soin apporté lors de la lecture de ce « gros pavé » (citation de M. Mars), ainsi que pour vos remarques et conseils très pertinents, votre bienveillance lors de la soutenance et vos encouragements avant mon oral et pour la suite de ma carrière professionnelle. Je voudrais remercier mes deux rapporteurs, non pas parce que selon M. Stephan eux seuls étaient obligés de lire en détails mon manuscrit, mais surtout pour la qualité de leurs rapports et les remarques très instructives qui m'ont permis de compléter et d'améliorer mon travail et m'ont offert une ouverture d'esprit.

Je tenais aussi à remercier l'école doctorale pour le suivi et le soutien, plus particulièrement Emmanuel. Merci pour tes conseils, d'avoir été à mon écoute et pour le temps que tu m'as consacré durant la rédaction du manuscrit. Nos discussions m'ont beaucoup apporté et m'ont permis de me recentrer sur l'essentiel.

Cette thèse et plus particulièrement l'acquisition des données, n'auraient jamais pu être réalisés sans l'aide et le soutien de STARESO. J'aimerai donc remercier Coco, Sylvain, Alex, Michelle et les autres membres de STARESO pour l'aide logistique qu'ils m'ont apporté, les connaissances sur la biologie marine qu'ils m'ont transmises, leurs disponibilités et surtout, pour leur accueil chaleureux. Outre l'aspect acoustique sous-marine & traitement d'images, ces aventures de « Caroline à Calvi » (Merci Thomas pour ce super titre de thèse) ont eu un apport précieux pour la communauté *d'étude physiologique et comportementale des Bretons* : ils ont permis de tester la résistance d'un Breton sous le soleil Corse en plein été, 11 heures d'affilée et sans ombre (*réponse : 5 jours avant insolation*). Alors un grand merci pour toutes les personnes de STARESO, ainsi que les plongeurs et les autres personnes présentes sur le site cette semaine-là qui m'ont fortement soutenue, veillé sur moi durant «*my watch* ». Merci pour votre bonne humeur, vos rires et ces instants de précieux que j'ai passé en votre compagnie qui m'ont aidé à tenir jusqu'à la fin des manips. Une dédicace spéciale à Palou et toutes ces rumeurs de « dessinatrice folle » et « d'Hermite du phare », qui ont fait les légendes de la pointe de la Revellata cette semaine-là.

Je tiens aussi à remercier mes collègues et anciens collègues de RTsys qui ont partagé avec moi ces quelques mois de thèse et qui m'ont permis d'ouvrir mes champs de connaissances sur plein de domaines variés. Merci Rémi, Christophe, Fabien, Cricri, Thomas, Yvan, Nico, Jaques, Christian, Annaïg, Guy, Luc, Romain, Richard et tous les autres pour cette super ambiance. J'aimerais aussi particulièrement remercier Maryse et Rémi qui m'ont fortement aidée lors la rédaction de mon manuscrit : Sans vous, je ne sais pas comment j'aurai fait donc MERCI beaucoup ! Un remerciement spécial à mes chefs de projets, « *mon commandant Nicolas et mes capitaines Goursaud et Leneveux* », pour votre tout ce que vous m'avez transmis et lorsque vous n'aviez pas les réponses, pour les mises ne relation. Au-delà de savoir métier, travailler avec vous trois a été humainement un véritable plaisir.

Ces remerciements font échos à ceux des autres *Milous*, avec qui j'ai eu l'occasion de travailler dans un cadre hors thèse et qui m'ont énormément appris. Merci à Dimitri, Romain, JoJo et l'équipage de l'AMT et désolée si je n'ai pas suivi votre arborescence de classification : « il n'y a que deux types de navires, les sous-marins et les cibles ». Un remerciement particulier à Dimitri, Benoit et Jeff qui ont cru en moi et permis de trouver les ressources suffisantes pour persévérer sur ce problème de classification malgré plus d'un an d'échec sur le sujet. Merci aussi à l'équipage de l'AMT pour ces souvenirs juste inoubliables ...

Merci aussi à ma famille, mes amis qui m'ont soutenu durant ces années de thèse, ainsi qu'aux belles rencontres réalisées lors de divers projets et lors de conférences.

Une pensée particulière à mes collègues et professeurs de karaté qui en plus de m'avoir permis de me défouler dans les pires moments, m'ont transmis beaucoup de choses sur le plan humain car faire une présentation devant 200 personnes, c'est un peu comme faire un kata devant vous tous. Vous avez été un réel soutien pour moi et avez été à mon écoute durant la rédaction, et même avant, alors merci beaucoup Véro, Yannick, Claude, Yvonnick, Albert d'avoir été là.

Je tenais aussi à remercier toutes les personnes qui ont fait le déplacement pour assister à ma soutenance, avec une pensée particulière pour ma Tata Annie et mon Tonton Alphonse. Vous voir dans la salle ce jour-là a été juste fantastique et magique, un réel partage de bonheur à chaque fois que je croisé vos regards et la fierté présente dans vos yeux ce jour-là restera l'un de mes plus beaux souvenirs de 2018 !

Sans oublier mes deux docteurs préférées : Dr Portail et Dr Colard. Malgré la distance, vous avez toujours été là pour moi quand ça n'allait pas, **je suis heureuse de vous compter parmi ma famille**. Merci beaucoup à toutes les deux pour le temps passé au téléphone, pour le soutien et pour les joies partagées. Je te remercie particulièrement petit jbeu pour tous tes conseils et l'écoute que tu m'as apportée !

Et pour finir, **la personne sans qui cette thèse n'aurait peut-être pas abouti**, mon conjoint. D'un point de vue un peu plus professionnel, je ne supprimerai jamais cette magnifique pyramide que tu as mis deux heures à faire sous SolidWorks® « *quel ingé méca de talent* ». Plus sérieusement, **Rémi, je pense que je ne trouverais jamais assez de mots pour te remercier pour tout ce que tu as fait**. Ton soutien à distance durant mes manip en Corse a été mon rayon de soleil d'ombre durant ces semaines. Malgré ton allergie très prononcée envers le traitement du signal et les mathématiques, tu m'as beaucoup aidée lors de la rédaction du manuscrit et tu as relu l'ensemble de ces quelques 290 pages. Merci pour ta patience, tes conseils, ton réalisme, ta bonne humeur et tous ces moments inoubliables que tu m'as offerts. Merci d'être toi.

Table des matières

Table des figures.....	v
Table des tableaux.....	xi
Notations et acronymes	xv
Introduction.....	1
1 Chapitre 1 : Du paysage acoustique au bruit rayonné par les navires	9
1.1 La propagation des sons dans un milieu marin	10
1.2 Le monitoring par acoustique sous-marine.....	11
1.3 Le paysage acoustique.....	12
1.4 Les questionnements autour du bruit rayonné des bateaux	17
1.5 Le bruit rayonné par les bateaux.....	19
1.6 Conclusion	28
2 Chapitre 2 : Présentation du site atelier et des bases de données	31
2.1 Introduction.....	32
2.2 Présentation du site	32
2.3 Présentation des bases de données.....	37
2.4 Conclusion	41
3 Chapitre 3 : Localisation et création de carte du trafic maritime par traitement d’images	47
3.1 Introduction.....	48
3.2 Problématique : une flottille de très petites embarcations sans l’AIS	49
3.3 Etat de l’art sur l’utilisation de caméra pour la cartographie, la correction des distorsions dues à l’effet grand angle et la détection d’objets en mouvement.....	50
3.4 Présentation de la méthode.....	53
3.5 Les performances de la méthode.....	59
3.6 Analyse du trafic maritime de la baie.....	65
3.7 Discussion	71
3.8 Conclusion	72
4 Chapitre 4 : Influence du trafic maritime côtier sur le bruit sous-marin de la baie de Calvi	75
4.1 Introduction.....	76
4.2 Descripteurs acoustiques caractérisant le bruit rayonné par le trafic maritime : Etat de l’art	77
4.3 Présentation des descripteurs acoustiques et des indicateurs du trafic maritime.....	78
4.4 Relation entre les descripteurs acoustiques et les indicateurs du trafic maritime.....	80
4.5 Discussion	96
4.6 Conclusion	98
5 Chapitre 5 : Impact du trafic maritime sur le budget acoustique de la baie de la Revellata	101

5.1	Introduction.....	102
5.2	Méthode de suivi des paysage acoustiques : Etat de l'art	103
5.3	Méthode d'évaluation des variabilités spatio-temporelles du paysage acoustique.....	104
5.4	Etude des variabilités spatio-temporelles du paysage acoustique de la baie.....	105
5.5	Discussion	115
5.6	Conclusion	117
6	Chapitre 6 : Caractérisation du bruit rayonné par les bateaux d'une flottille côtière	123
6.1	Introduction.....	124
6.2	Descripteur pour la détection et la classification de sources continues avec présence de tonale : état de l'art.....	125
6.3	Présentation de la base de données et des espaces de représentation.....	130
6.4	Visualisation des bruits rayonnés à travers différents espaces de représentation	133
6.5	Discussion	143
6.6	Conclusion	145
7	Chapitre 7 : Descripteurs pour la classification d'une flottille côtière	147
7.1	Introduction.....	148
7.2	La réduction de dimension: l'état de l'art	149
7.3	Aptitude des descripteurs acoustiques à différencier des classes correspondant à chaque paramètres descriptifs des bateaux	162
7.4	Discussion	180
7.5	Conclusion	182
8	Chapitre 8 : Détection et classification automatiques de bateaux	185
8.1	Introduction.....	186
8.2	L'apprentissage supervisé : l'Etat de l'art.....	187
8.3	Présentation des méthodes : classifieur, base d'apprentissage et sélection d'attributs....	190
8.4	La détection et la classification acoustique des bateaux par apprentissage supervisée	195
8.5	Discussion	212
8.6	Conclusion	213
	Conclusions, perceptives et ouverture.....	215
	Conclusions.....	215
	Perspectives.....	218
	Ouverture	220
	Annexe 1 : Traitement d'images GoPro®	223
	Précision sur la méthode : formule pour passer d'un pixel de l'image GoPro à un pixel de la carte	
	223	
	Performance de localisation.....	223

Annexe 2 : Solutions paramétriques simples permettant de relier les descripteurs acoustiques aux indicateurs du trafic maritime.....	231
Estimation du SPL en fonction du logarithme en base dix la distance au plus proche	231
Solutions paramétriques simple reliant l'ANL au nombre de bateaux	233
Annexe 3 : les espaces de représentations et les algorithmes spécifiques	235
L'analyse spectrale	235
L'analyse DEMON	235
L'analyse cepstrale	235
L'analyse des coefficients de Mel (MFCC Mel-Frequency Cepstral Coefficients)	236
L'analyse par ondelette et par paquets d'ondelette.....	236
L'algorithme de détection de fondamentale et d'estimation de la distribution d'harmoniques ...	238
L'algorithme de détection de rupture spectrale	240
Bibliographie.....	243

Table des figures

Figure 1: Propagation des ondes acoustiques en fonction du profil de célérité. Source [Erbe_2010].	10
Figure 2 : Les différentes composantes du paysage acoustique	13
Figure 3 : Gamme de fréquence des vocalises de mysticètes et des sifflements d'odontocètes. Source [LeBot_a_2015]	14
Figure 4 : Spectrogramme de vocalises et clics de cétacés (à gauche), d'émissions réalisées par des poissons (au centre) et de clics benthiques (à droite)	15
Figure 5 : Modélisation du bruit ambiant selon [Wenz_1962] – Source : [Erbe_2010].....	16
Figure 6 : Questionnements liés à l'étude par acoustique sous-marine passive des bruits rayonnés par les bateaux	18
Figure 7 : La cavitation des hélices : à gauche la représentation du diagramme thermodynamique correspondant au phénomène de cavitation, au centre la visualisation du sillage de bulles créées par le phénomène de cavitation de l'hélice (Source : https://heliciel.com/aerodynamique-hydrodynamique/cavitation-%20helices-hydrofoils.htm) et à droite la dégradation induite par le phénomène de cavitation (Source : Wikipédia).....	20
Figure 8 : Fonctionnement d'un moteur 4 temps (Source : https://www.ornikar.com/code/cours/mecanique-vehicule/moteur)	22
Figure 9 : Le miroir de Lloyds : explication du phénomène (à gauche) et visualisation sur spectrogramme (à droite)	23
Figure 10 : L'effet Doppler, explication du phénomène de propagation (à gauche) et visualisation sur spectrogramme de l'effet Doppler d'un bateau allant à 16.6 nœuds sur une raie à 872 Hz (au centre et à droite).....	24
Figure 11 : Standardisation sur la mesure de bruits rayonnés des bateaux par la norme ANSI -ASA S12.64.....	27
Figure 12 : La baie de Calvi est un espace protégé habitant une grande richesse écologique, soumise à une forte pression anthropique durant la saison estivale. Cette carte est extraite et traduite de [Magnier_2016b].....	33
Figure 13 : La baie de Calvi est située en Corse et fait partie du sanctuaire Pelagos	34
Figure 14 : Carte des habitats de la baie de Calvi avec en rouge le coralligène, en jaune le sable, en vert l'herbier de posidonie et la cymodocée (plante aquatique), en marron la roche et les galets, en violet, les zones correspondant à la matre morte (source Lamb93) et en trait pointillé rouge, le trafic maritime.	35
Figure 15 : Position des enregistreurs.....	37
Figure 16 : Localisation et présentation de l'observatoire GoPro.....	39
Figure 17 : Exemple de carte manuscrite	40
Figure 18 : Synthèse sur les bases de données créées.....	42
Figure 19 : Proportions de chaque catégorie de bateaux parmi 2943 bateaux.....	49
Figure 20 : Carte du trafic maritime durant la session de Juillet 2016 réalisée en considérant uniquement les données AIS.....	50
Figure 21 : Schéma blocs des étapes de la méthode	53
Figure 22 : Méthode de détection des bateaux par traitement d'images	54
Figure 23 : Exemple d'estimation de la moyenne, de la variance et des seuils pour une session de 10 différences d'images, en considérant la couleur rouge, un maillage 50x50 pixels et une Pfa de 10 – 12	55
Figure 24 : Carte de détection pour 1 heure de données de l'ensemble des images GoPro® (à gauche) et avec sélection des zones maritimes (à droite).....	56

Figure 25 : Maillage des images GoPro®	57
Figure 26 : Explication de la localisation et des variables pour les fonctions de géo référencement ..	58
Figure 27 : Méthode de relocalisation des pixels de l'image sur la carte de la baie de Calvi	58
Figure 28 : Différence de rouge entre deux images consécutives pour une session matinale, ainsi que les matrices de moyenne et de variance par maille.....	59
Figure 29 : Incertitude sur le positionnement sur l'axe orthogonal, pour la GoPro® A (à gauche) et pour la GoPro® T (à droite) avec application d'un seuil de 1 pixel (3,47 m)	61
Figure 30 : Carte de la baie de Calvi avec en trait plein les positions GPS des 8 parcours considérés et en pointillés la relocalisation du bateau effectuée en utilisant les fonctions de repositionnement....	62
Figure 31 : Ecart de positionnement entre les coordonnées GPS et la relocalisation depuis les images des caméras – Sur cette carte, la terre est représentée en noir, la mer est représentée en gris et l'écart de localisation est représenté en échelle de couleur allant du noir au rouge.....	62
Figure 32 : Relocalisation des tracés allant vers l'Alga en ajoutant les coordonnées GPS comme amers. Les traces rouges correspondent aux données GPS, les traces jaunes correspondent au positionnement en utilisant les amers classiques et les traces vertes correspondent à la localisation en utilisant les amers classiques ainsi que l'ensemble des coordonnées GPS du trajet 1 comme amer. Les étoiles rouges correspondent aux amers visibles sur cette portion de carte.....	64
Figure 33 : Zone de détection et zones d'exclusions du traitement par images	65
Figure 34 : Valeur statistique des trois quartiles du nombre de bateaux traversant la baie de Calvi par session de 10 minutes	67
Figure 35 : Carte du trafic maritime par heure : nombre de détections par zone de 12 m ² et par heure	68
Figure 36 : Carte du trafic maritime par jours : nombre de détections par zone de 12 m ² et par heure	69
Figure 37 : Carte du trafic maritime de l'ensemble de la session pour l'ensemble de la baie (à gauche) et pour la zone de détection avec marquage des rails « Revellata-Citadelle » et « Revellata-Alga » (à droite).....	70
Figure 38 : Synthèse de la carte du trafic maritime	73
Figure 39 : Synthèse des descripteurs acoustiques.....	79
Figure 40 : Illustration des indicateurs du trafic maritime	80
Figure 41 : Corrélations de Pearson (en haut) et de Spearman (en bas) entre le SPL et Trafic_Nb_X (à gauche) et entre le SPL et Trafic_Pre_X (à droite) en fonction des bandes de tiers d'octaves	82
Figure 42 : SPL en fonction de la distance du bateau au plus proche (en haut) et en fonction du logarithme en base dix de cette distance (en bas), pour la bande de fréquence 10 Hz – 30 kHz (à gauche) et la bande de tiers d'octave de 1250 Hz (à droite)	83
Figure 43 : Niveau SLQ _{i, f} (à gauche) et coefficient de pente kQ _{i, f} (à droite) en fonction de la bande de tiers d'octave pour les différents quartiles (Q1 : vert - Q2 : rouge - Q3 : bleu - Whisker : noir)	84
Figure 44 : Probabilité de dépassement du niveau ambiant en fonction de la distance de l'anneau, pour la bande de fréquence 100Hz- 30 kHz (à gauche) et pour la bande de tiers d'octave de 1250 Hz (à droite), observations (en bleu) et modélisation par une loi logarithmique (en rouge)	85
Figure 45 : Niveau ANL en fonction du nombre de bateaux par disque	88
Figure 46 : Spectre ANL ₀ (à gauche) et coefficient de pente k (à droite) en fonction de la bande de tiers d'octave pour les différents disques	89
Figure 47 : Corrélations de Pearson (en haut) et de Spearman (en bas) entre l'ANL et le logarithme en base dix du nombre de bateaux en présence (à gauche) et en absence (à droite) des sessions avec vent en fonction des bandes de tiers d'octaves.....	91

Figure 48 : Représentation de l'ANL en fonction du logarithme en base dix du nombre de bateaux, pour les disques de 100 à 1000m de rayon, et pour les deux bandes considérées : la bande de fréquence 100Hz- 30 kHz (en haut) et bande de tiers d'octave de 2500 Hz (en bas).....	92
Figure 49 : Affichage des observations d'ANL en fonction du nombre de bateaux et des lois définissant la valeur médiane et l'intervalle pour la bande de fréquence de 100 Hz à 30 kHz (en haut) et la bande de tiers d'octave de 2500 Hz (en bas)	94
Figure 50 : Synthèse sur l'influence du trafic maritime sur le bruit sous-marin	99
Figure 51 : Séparation évolutive en fonction des saisons des périodes correspondant au jour (jaune) et à la nuit (bleu).	104
Figure 52 : Etude des variabilités spatio-temporelles du paysage acoustique	105
Figure 53 : Spectrogramme durant la saison estivale, au plus proche du trafic maritime	107
Figure 54 : Diagramme quantile-quantile au plus proche du trafic maritime (juillet 2016)	108
Figure 55: Fonctions de répartition durant le jour (trait plein) et durant la nuit (trait en pointillée) en fonction des variations saisonnières : juillet 2015 (jaune), septembre 2015 (Gris) et octobre 2015 (Orange).....	110
Figure 56 : Fonction de densité de probabilité diurne en Juillet 2016 (bleu) et Juillet 2015 (vert)....	111
Figure 57 : Fonctions de répartition durant le jour (jaune) et durant la nuit (bleu) en fonction des variations spatiales : au plus proche du trafic (trait plein) et au plus loin du trafic (trait en pointillés)	112
Figure 58 : Diagramme quantile-quantile entre les données de jour au plus proche du trafic et au plus loin du trafic maritime.....	112
Figure 59 : Evolution journalière du niveau SPL (à gauche) et de l'ANL (à droite) dans la bande 100 Hz- 30 kHz au plus proche du trafic maritime : Estimation du pourcentage de dépassement du seuil par session de 10 minutes.....	113
Figure 60 : Evolution journalière du niveau SPL (à gauche) et de l'ANL (à droite) dans la bande 100 Hz- 30 kHz au plus loin du trafic maritime : Estimation du pourcentage de dépassement du seuil par session de 10 minutes.....	114
Figure 61 : Synthèse sur la sélection d'indicateurs acoustiques de suivi environnemental des pressions anthropiques	119
Figure 62 : Méthode de détection et classification des bruits rayonnés de bateaux présent dans la communauté d'acoustique sous-marine.....	125
Figure 63 : Paramètres et méthodes de détection et de classifications utilisées dans la communauté de traitement de parole et de la classification de genres musicaux.....	129
Figure 64 : Exemple de catégories de bateaux.....	131
Figure 65 : Modification de la forme de la bosse de bruit et de l'espacement des harmoniques sur la bosse de bruit.....	134
Figure 66 : PSD de l'ensemble des sessions marquées par d'harmoniques fortement marquées hors de la bosse de bruit	134
Figure 67 : Raies auxiliaires sur les PSD de navettes et de grandes embarcations.....	135
Figure 68 : Fonctions de densité de probabilité des PDF des niveaux ramenés à 1 m	135
Figure 69 : Exemple de spectres DEMON pour les navettes, moyen et grand yacht.....	136
Figure 70 : Variété de spectres DEMON pour les semi-rigides	137
Figure 71 : Fonctions de densité de probabilité du spectre DEMON normalisée	137
Figure 72: Difficulté lors de l'identification des caractéristiques de propulsion par analyse DEMON	138
Figure 73 : Ratio entre les variations observées à une qu'éfrencce donnée pour un même passage de bateaux et celles observées pour l'ensemble de la flottille (en haut), et les valeurs médians, du 25 ^{ème} et 75 ^{ème} centile de cet indicateur (en bas)	139
Figure 74 : Caractérisation du cepstre du bruit rayonné par les bateaux.....	139

Figure 75 : Fonctions de densité de probabilité du cepstre en fonction de la quéfrence par catégorie de bateaux.....	140
Figure 76 : Illustration de la rupture spectrale au sein du cepstre	141
Figure 77 : Ratio des variations observées pour un coefficient MFCC donné durant le un même passage de bateaux et de celles observées pour l'ensemble de la flottille (en haut), et les valeurs médians, du 25 ^{ème} et 75 ^{ème} centile pour l'ensemble de la flottille (en bas).....	141
Figure 78 : Caractérisation de l'amortissement des coefficients MFCC du bruit rayonné par les bateaux.....	142
Figure 79 : Fonctions de densité de probabilité des coefficients MFCC par catégorie de bateaux....	143
Figure 80 : Descripteurs caractérisant la bosse de bruit spectral	150
Figure 81 : Schéma de la méthode de d'estimation de la distribution d'harmoniques.....	151
<i>Figure 82 : Illustration du phénomène d'inharmonicité</i>	<i>153</i>
<i>Figure 83 : Descripteurs caractérisant l'amortissement.....</i>	<i>153</i>
Figure 84 : Schéma de l'algorithme de détection de rupture spectrale	154
Figure 85 : Exemples d'arborescence de classification de bateaux	161
Figure 86 : Matrice d'autocorrélation des descripteurs acoustiques (à gauche) et avec application des seuils (à droite).....	162
Figure 87 : Indicateur de la robustesse des descripteurs acoustiques par rapport aux effets de propagation pour l'ensemble des bateaux (en haut), et les valeurs médians, du 25 ^{ème} et 75 ^{ème} centile de cet indicateur (en bas).....	163
Figure 88: Affichages des trois triplets de composants principales pour l'ensemble des descripteurs acoustiques.....	164
Figure 89 : Affichage des 3 premières composantes principales en fonction de la vitesse au CPA ...	165
Figure 90 : Affichage des 3 premières composantes principales en fonction de la distance au CPA .	165
Figure 91 : Affichage des 3 premières composantes principales en fonction de la catégorie de bateaux	165
Figure 92 : 3 premières composantes principale de l'ACP pour les paramètres liées à la vitesse du bateau.....	168
Figure 93 : 3 premières composantes principale de l'ACP pour les paramètres liées à la distance du bateau.....	168
Figure 94 : 3 premières composantes principale de l'ACP pour les paramètres liées à la longueur du bateau.....	169
Figure 95 : Critère de comparaison des diagrammes box-plots.....	169
Figure 96 : ACP pour les descripteurs minimisant le critère d'étude en fonction du type de moteur (in ou hors bords) :	171
Figure 97 : ACP pour les descripteurs minimisant le critère d'étude en fonction du type de catégorie de bateaux.....	171
Figure 98 : ACP lors du choix du deuxième étage de classification en considérant les descripteurs ayant une corrélation > 0.3	173
Figure 99 : ACP pour le choix du troisième étage de classification en fonction de la vitesse du bateau (48.88 % de la variance observée).....	174
Figure 100 : ACP pour le choix du troisième étage de classification des grandes embarcations de moins de 16 m	175
Figure 101 : ACP pour le choix du deuxième étage de classification des petites embarcations	177
Figure 102 : ACP pour le choix du troisième étage de classification en fonction de la catégorie de bateau – sélection réalisée en considérant la corrélation (73.20 % de la variance observée).....	178

Figure 103 : ACP pour le choix du troisième étage de classification en fonction de la catégorie de bateau – sélection réalisée en considérant le critère sur box plot (73.20 % de la variance observée)	178
Figure 104 : ACP pour le choix du troisième étage de classification en fonction de la longueur du bateau (70.13 % de la variance observée)	179
Figure 105 : Arborescence de classifications acoustiques des embarcations de la flottille côtière ...	179
Figure 106 : Présentation de quatre méthodes de classification supervisées discriminantes	188
Figure 107 : Spectrogrammes d'une séquence correspondant à de l'activité benthique, des émissions de poissons individualisables, émissions du chorus de poissons, la présence d'une averse.....	190
Figure 108 : Arborescence de classifications acoustiques des embarcations de la flottille côtière ...	191
Figure 109 : Schéma de classification.....	193
Figure 110 : Evolution du pourcentage de détection correcte en fonction du nombre de paramètres acoustiques sélectionnés	199
Figure 111 : évolution du pourcentage de détection correcte en fonction du nombre de paramètres acoustiques considérés pour l'analyse spectrale (à gauche), MFCC (au centre) et cepstrale (à droite)	202
Figure 112 : Fonctions de densité de probabilité du pourcentage de détections correctes pour 100 000 bases d'apprentissage	204
Figure 113 : Nombre de sessions associées à un même bateau en fonction de la prédiction réalisée par l'algorithme de classification	206
Figure 114 : Pourcentage de détection par classes et par intervalles de 10 secondes.....	207
Figure 115 : Fonctions de densité de probabilité de la probabilité associée à chaque prédiction réalisée par l'algorithme de classification, normalisée en considérant l'ensemble d'une classe.....	208
Figure 116 : Trapèze d'incertitude lors de la relocalisation	224
Figure 117 : Géolocalisation sur la carte de Calvi des paraboles des images GoPro® A (à gauche) et T (à droite) correspondant à un maillage de parabole espacé de 1 pixel	225
Figure 118 : Incertitude sur le positionnement sur l'axe orthogonal, pour la GoPro® A (à gauche) et pour la GoPro® T (à droite) avec application d'un seuil de 1 pixel	226
Figure 119 : Carte de la baie de Calvi avec en trait plein les positions GPS des 8 parcours considérés et en pointillés la relocalisation du bateau effectuée en utilisant les fonctions de repositionnement..	227
Figure 120 : Erreur de positionnement entre les coordonnées GPS et la relocalisation depuis les images des caméras	228
Figure 121 : Schéma de l'analyse DEMON	235
Figure 122: Schéma block de la méthode d'estimation des coefficients MFCC et banc de filtre de Mel	236
Figure 123: Décomposition multi-échelle par paquet d'ondelettes avec Hn le filtre passe haut et Gn le filtre passe bas.....	237
Figure 124 : Schéma de la méthode de d'estimation de la distribution d'harmoniques.....	239
Figure 125 : Schéma de l'algorithme de détection de rupture spectrale	240

Table des tableaux

Table 1 : Caractéristique de sources anthropiques avec Omni: omnidirectionnel; CW: bruit continu; V: vertical; H: horizontal; 10 000 lb = 4536 kg; 98 lb = 44 kg extrait de [Hildebrand_2009]	15
Table 2 : Caractérisation de raies induites par une propulsion hélice	21
Table 3 : Caractérisation de raies induites par une motorisation à piston [Ogden_2011]	22
Table 4 : Principaux modèles paramétriques de spectre de bruit rayonnés par les navires	26
Table 5 : Caractéristiques des différentes sessions d'enregistrement	38
Table 6 : Incertitudes sur la distance Dorthomin et la surface d'incertitude globale, pour les deux GoPro® : incertitude maximale et distance à partir de laquelle l'incertitude dépasse une valeur fixée	60
Table 7 : Ecart de localisation : Distance Dorthomin à partir de laquelle l'écart de localisation est inférieur à u seuil fixe, et pourcentage que représente l'incertitude par rapport à la distance Dorthomin	62
Table 8 : Incertitude sur la distance bateau-enregistreur et sur l'estimation des pertes de propagation en fonction de la distance mesurée	65
Table 9 : Statistique sur le nombre de bateaux pour différentes durées d'observation	67
Table 10 : Pourcentage de pixel sans détection et valeur médiane de détection par pixel par heure pour différente session.	69
Table 11 : Définition des indicateurs du trafic maritime.....	80
Table 12 : Coefficient de corrélation de Pearson CP et de Spearman CS entre le niveau SPL et les nombre de bateaux Nb ou le logarithme en base dix du nombre de bateaux $\log_{10}(Nb)$ présent dans un disque de 100m à 3000 m	81
Table 13 : Coefficient de corrélation de Pearson CP, de SpearmanCS , coefficient k et niveau à l'origine de la régression linéaire entre le SPL et le logarithme en base dix de la distance du bateau le plus proche, pour l'ensemble des données ou pour les 3 premiers quartiles et le whisker.....	86
Table 14 : Coefficient de corrélation de Pearson CP et de Spearman CS entre le niveau ANL et le logarithme de distance au plus proche	87
Table 15 : Coefficient de corrélation de Pearson et de Spearman entre le niveau ANL estimé dans la bande 100 Hz- 30 kHz et les nombre de bateaux présent dans un disque de 100m à 1000 m	88
Table 16 : Coefficient de corrélation de Pearson CP, de SpearmanCS , coefficient k et niveau à l'origine de la régression linéaire entre l'ANL et le logarithme en base dix du nombre de bateaux pour les disques de 100 m à 3000m.	90
Table 17 : Coefficient de corrélation de Pearson, $ANL0Q_i, f, R$ et de pente kQ_i, f, R obtenu par régressions linéaires des valeurs quartiles de l'ANL en fonction du logarithme du nombre de bateaux pour la bande 100Hz-30 kHz et la bande de tiers d'octave de 2500 Hz.....	93
Table 18 : Pourcentage de variance des observations expliquées pour les deux lois modélisant l'ANL et le nombre de bateaux	95
Table 19 : Largeur maximale et variation de la largeur de l'intervalle d'incertitude du modèle paramétrique caractérisant l'ANL en fonction du nombre de bateaux	95
Table 20 : Evolution en fonction du coefficient c, pour un disque de rayon 100 m et de rayon 500 m et pour la bande 100 Hz -30 kHz, de la largeur de l'intervalle d'incertitude, pour un niveau ANL supérieur à 3 et 5 dB par rapport au niveau minimale, et du pourcentage d'observation en accord avec la loi, pour l'ensemble des échantillons et pour les échantillon ayant un nombre de bateau supérieur au nombre minimal, du modèle paramétriques caractérisant le nombre de bateau en fonction de l'ANL	95
Table 21: Descripteurs acoustiques	104

Table 22 : Niveau moyen, médian et le plus probable pour les distributions correspondant au jour et à la nuit, pour les 4 sessions d'enregistrement et pour les 4 descripteurs acoustiques	106
Table 23 : Différences entre aux fonctions de répartitions du jour et de la nuit	108
Table 24 : Pourcentage de sessions de 10 minutes dont le descripteur acoustique observe un dépassement du niveau de référence supérieur à 6 à 9 minutes durant le jour et durant la nuit, au plus proche du trafic maritime	113
Table 25 : Comparaison du pourcentage de session diurne dépassement le niveau de référence entre une position proche et éloigné du trafic maritime	114
Table 26 : Pourcentage de dépassement du niveau de référence durant la saison estivale pour la bande 100 Hz – 30 kHz	114
Table 27 : Synthèse des méthodes utilisées dans la communauté d'acoustiques aérienne pour la détection et la classification de véhicule motorisé terrien et aérien.....	128
Table 28 : Descripteurs caractérisant la présence de raie sur le spectre et le spectre DEMON.....	151
Table 29 : Descripteurs liés à la présence d'harmoniques	152
Table 30 : Descripteurs associés aux harmoniques issus de la classification de genre musicaux.....	152
Table 31 : Descripteur acoustique de la forme d'une distribution	155
Table 32 : Descripteur acoustique du « spectrogramme » [Tucker_2005].....	156
Table 33 : Descripteurs acoustique associée à la modélisation paramétrique d'ordre P	157
Table 34 : Liste des descripteurs temporels.....	158
Table 35 : Liste des descripteurs spectraux.....	158
<i>Table 36: Liste des descripteurs de la distribution par harmonique.....</i>	159
Table 37 : Liste des descripteurs de l'analyse DEMON	159
Table 38: Liste des descripteurs de l'analyse des MFCC	159
Table 39 : Liste des descripteurs de l'analyse du cepstre	160
Table 40 : Liste des descripteurs de sur les spectrogrammes.....	160
<i>Table 41: Liste des descripteurs de la distribution par paquet d'ondelette</i>	160
Table 42 : Descripteurs acoustiques les plus et moins robustes aux effets de propagation	164
Table 43 : Synthèse des informations relatives à l'ACP par domaine d'analyse.....	166
Table 44 : Liste de descripteurs discriminant au vue de résultats de corrélation	167
Table 45 : Liste des critères les plus pertinents pour chaque classe de paramètre qualitatif	170
Table 46 : Liste des descripteurs acoustiques les plus pertinents pour le choix du second étage	172
Table 47 : Corrélation liée au choix du troisième étage de classification	174
Table 48 : Corrélation pour le choix du second étage pour les petites embarcations.....	176
Table 49 : Synthèse sur le choix du troisième étage pour les petites embarcations	177
Table 50 : Pourcentage de descripteurs acoustiques présentant une redondance et étant les moins robustes à la propagation lors de la sélection de chaque embranchement de l'arborescence de classification	180
Table 51 : Détail sur le nombre de séquences de la base de données biologiques, météorologiques et anthropiques lointaines	190
Table 52 : Algorithme de sélections de descripteurs	194
Table 53 : Sélection manuelle des descripteurs acoustiques.....	195
Table 54 : Mode de sélection des proportions de la base d'apprentissage.....	195
Table 55 : Matrice de confusion du premier étage de classification en pourcentage	196
Table 56 : Matrice de confusion du deuxième étage de classification en pourcentage	196
Table 57 : Matrice de confusion du troisième étage de classification en pourcentage	197
Table 58 : Pourcentage de classification correcte en fonction du nombre de composante principale considérée	197
Table 59 : Matrice de confusion en pourcentage en conservant 50 % de la variance de l'ACP	198

Table 60 : Matrice de confusion en pourcentage en conservant 80 % de la variance de l'ACP	198
Table 61 : Matrice de confusion après sélection manuelle des descripteurs et utilisation du Random Forest.....	199
Table 62 : Sélection de descripteurs optimaux réalisés par l'algorithme de sélection automatiques d'attribut	200
Table 63 : Matrice de confusion après sélection automatiques des descripteurs et utilisation du Random Forest	200
Table 64 : Matrice de confusion en pourcentage – SPECTRALE.....	201
Table 65 : Matrice de confusion en pourcentage – MFCC	201
Table 66 : Matrice de confusion en pourcentage – CEPSTRE.....	201
Table 67 : Sélection de descripteurs optimaux réalisés par l'algorithme de sélection automatiques d'attribut pour les méthodes d'analyse spectrale, des coefficients MFCC et de l'analyse cepstrale.	202
Table 68 : Matrice de confusion en pourcentage après sélection automatique des descripteurs acoustiques- SPECTRALE	203
Table 69 : Matrice de confusion en pourcentage après sélection automatique des descripteurs acoustiques – MFCC	203
Table 70 : Matrice de confusion en pourcentage après sélection automatique des descripteurs acoustiques – CEPSTRE.....	203
Table 71 : Matrices de confusion en pourcentage obtenu après reconstitution des deux premiers étages de classification en se basant sur les résultats du 3 ^{ème} étage de classification pour la sélection automatique des descripteurs acoustiques MFCC.....	204
Table 72 : Matrice de confusion en pourcentage après sélection automatique des descripteurs acoustiques et la base d'apprentissage optimale pour chaque étage.....	205
Table 73 : Matrice de confusion en pourcentage après sélection automatique des descripteurs acoustiques et la base d'apprentissage optimale pour chaque étage.....	209
Table 74 : Matrices de confusion en pourcentage pour la détection de bateau avec B la classe présence d'un bateau et B la classe absence de bateaux.....	209
Table 75 : Pourcentage d'apparition des non détection en fonction de la durée par rapport au CPA	210
Table 76 : Présentation des classes acoustiques des bruits non attribuée aux passages de bateaux	210
Table 77 : Matrices de confusion en pourcentage de la détection d'un bateau au loin non attribuée au passage de bateaux pour les 4 ensembles d'attributs	211
Table 78 : Matrices de confusion en pourcentage de la classification des bruits non attribuée au passage de bateaux pour les 4 ensembles d'attributs : l'ensemble des attributs (en haut – gauche), pour la sélection manuelle d'attribut (en haut – à droite), pour la sélection automatique sur l'ensemble des paramètres (en bas – à gauche) et pour la sélection automatique sur les paramètres MFCC (en bas – à droite)	211
Table 79: Résultat de la régression linéaire entre l'erreur de localisation et la distance Dorthomin pour les différents trajets.	229
Table 80: Affichage des résultats de la régression linéaire entre la valeur statistique obtenue pour le Cème centile du SPL et le logarithme en base dix de la distance la plus proche, pour la bande de fréquence 100 Hz – 30 kHz (à gauche) et la bande de tiers d'octave de 1250 Hz (à droite). Les résultats, en bleu, correspondent aux coefficients $SLC_{\text{Cèmecentile}}$, $AC_{\text{Cèmecentile}}$ et au coefficient de régression linéaire en fonction de l'indice du centile. Les courbes rouges correspondent aux résultats de la modélisation de ces coefficients par des lois quadratique en fonction de l'indice du centile.	231
Table 81 : Résultat des régressions linéaires des coefficients $SL_{\text{pèmecentile}}$, $Ap_{\text{èmecentile}}$ en fonction de l'indice du centile.	232

Table 82 : Résultat des régressions linéaires des valeurs statistiques de l'ANL en fonction du logarithme du nombre de bateaux	233
Table 83 : Paramètres de réglage de l'algorithme d'estimation des distributions d'harmoniques....	239

Notations et acronymes

ACP	<i>Analyse par composante principale ou Principal Component Analysis</i>
AIS	<i>Système Automatique d'Identification ou Automatic Identification System</i>
ANL	<i>Niveau de bruit ambiant ou Ambient Noise Level</i>
ANSI	<i>Institut américain de normalisation ou American National Standard Institute</i>
ANOVA	<i>Analyse de la variance ou Analysis of variance</i>
AR	<i>Autorégressif ou autoregressive</i>
BDD	<i>Base De Donnée ou data base</i>
CPA	<i>Point de passage au plus proche ou The Closest Point of Approach</i>
DCSMM	<i>Directive Cadre pour la Stratégie pour le Milieu Marin</i>
DEMON	<i>Détection de modulation de l'enveloppe ou Detection of Envelope Modulation On Noise</i>
FFT	<i>Transformé de Fourier rapide ou Fast Fourier Transform</i>
IHM	<i>Interface Homme Machine</i>
ISO	<i>Organisation internationale de normalisation ou International Standardization Organization</i>
GPS	<i>Géo-positionnement par satellite ou Global Positioning System</i>
MFCC	<i>Coefficient de Mel ou Mel-Frequency Cepstral Coefficients</i>
MMSI	<i>Identité du service mobile maritime ou Maritime Mobile Service Identity</i>
NRC	<i>Conseil National de Recherche ou National Research Council</i>
ovo	<i>Un contre un ou one-against-one '</i>
PSD	<i>Densité spectrale de Puissance ou Power Spectral Density</i>
Rms	<i>Moyenne en racine carré ou Root Mean square</i>
RL	<i>Niveau reçu ou Received Level</i>
SONAR	<i>Système de détection et localisation d'objet par acoustique sous-marine ou SOund Navigation And Ranging</i>
SEL	<i>Niveau d'exposition sonore ou Sound Exposure Level</i>
SL	<i>Niveau source ou Source Level</i>
SPL	<i>Niveau de pression sonore ou Sound Pressure Level</i>
SVM	<i>Machines à vecteurs de support ou Support Vecteur Machine</i>
SVM-RFE	<i>Machines à vecteurs de support à élimination récursive de paramètres ou SVM Recursive Feature Elimination</i>
TL	<i>Perte de propagation ou Transmission Loss</i>

Introduction

Indispensable à la vie et abritant une très grande biodiversité, l'océan recouvre 71% de la surface du globe et représente 97% de l'eau sur la planète. Il joue un rôle majeur dans l'équilibre environnemental en prenant part, entre autres, à la régulation du climat (vecteur de transfert de chaleur de l'équateur aux pôles), au stockage du carbone (93% du carbone sur la planète est stocké dans l'océan) et à l'apport d'oxygène (50% de l'oxygène produit) [Falkowski_1998]. Pour l'homme, cet océan est la source de nombreuses richesses nutritionnelles et de ressources précieuses (pétrole, gaz, sel, eau). L'océan façonne son tissu économique : pêche, transport maritime (80% du commerce international transite par la mer), exploitation et énergie offshore, avec au total 140 millions de personnes qui ont un emploi lié à l'océan [Robinson_2015]. D'après l'UICN (Union Internationale pour la Conservation de la Nature), plus de 60 % de la population mondiale vit à moins de 150 km du rivage. Avec l'installation des énergies renouvelables en mer, l'océan devient alors source d'énergie représentant 0.2% de la production d'énergie mondiale. L'Organisation de Coopération et de Développement Economiques a chiffré à 1 500 milliards de dollars la valeur ajoutée apportée par l'océan, représentant alors 2.5% de la valeur ajoutée mondiale et le classant, s'il était un pays, au 7^{ème} rang mondial. Parallèlement, des économistes ont estimés à 49700 milliards de dollars par an les services rendus par l'océan [Costanza_2014].

Menacé, conséquence de diverses activités humaines, l'équilibre de ses écosystèmes est fragilisé. La pêche intensive est un des facteurs majeurs de cette dégradation et contribue à la destruction de l'habitat naturel [Worm_2006, Diaz_2008]. 50% des émissions de CO₂ d'origine humaine sont absorbées par l'océan [Sarmiento_1998, Legendre_1989]. Cette modification de la quantité de CO₂ présente dans l'eau crée une acidification du milieu marin, impactant directement le développement de certains organismes tels que le phytoplancton et les coraux [Hoegh-Guldberg_2007] (20% des récifs ont définitivement disparu selon l'Institut océanographique de Monaco, toutes menaces confondues). La disparition du phytoplancton a une conséquence directe sur le taux d'oxygène et la chaîne alimentaire. D'autre part la pollution de l'océan augmente : dans le nord de l'océan Pacifique, la pollution liée au plastique forme un continent grand comme six fois la France [Gigault_2016]. La majeure partie des polluants plastiques (90 % représentant 270 000 tonnes) présents dans l'eau sont des micro-plastiques invisibles et difficilement récupérables [Goldstein_2012].

L'océan reste un milieu méconnu à 95 % inexploré : moins de 2000 espèces marines sont recensées parmi les 15 000 à 20 000 nouvelles espèces animales et végétales découvertes chaque année [Costello_2012, IISE_2009, IISE_2010, IISE_2011]. Cette méconnaissance s'explique par les conditions extrêmes qu'il impose : absence de lumière, présence de fortes pressions et de courants, mauvaise pénétration des ondes électromagnétiques. Subissant ces mêmes contraintes, la faune marine utilise alors les ondes acoustiques pour se localiser, localiser des proies et communiquer. Les **ondes acoustiques se propagent sur de grandes distances** et sont réfléchies lorsqu'elles rencontrent un obstacle. Leur propagation étant très favorable dans l'environnement marin, ces ondes acoustiques sont un moyen intéressant pour explorer ce type de milieu, et ainsi est né le développement des sciences liées à l'*acoustique sous-marine*. L'observation est faite en mode actif par l'émission d'ondes et l'analyse des échos reçus, ou en mode passif par simple écoute, discrète, non intrusive et continue. L'étude passive est connue sous le terme de **monitorage par acoustique passive** ou *Passive Acoustic Monitoring* (PAM).

L'océan subit également une altération de son paysage acoustique. En effet, l'intensification du trafic maritime, l'activité militaire, le développement de zones portuaires, l'essor des activités nautiques récréatives, la création de nouveaux espaces sur la mer, la prospection sismique ou encore l'installation des énergies renouvelables en mer créent de nouvelles sources acoustiques dans l'océan [MacGillivray_2006, Erbe_2009, Hildebrand_2009, Lossent_2017]. **Le principal contributeur anthropique des bruits sous-marins est le trafic maritime.** L'intensification du trafic hauturier modifie le paysage acoustique [McDonald_2006, McDonald_2008, Andrew_2011]. Depuis les années 1970, l'augmentation du trafic maritime hauturier a provoqué dans certaines zones une augmentation du bruit ambiant de plus de 10 dB dans la bande 25-40 Hz [Andrew_2002, Kinda_2013a]. En 2010, en réponse à cette préoccupation, la **Directive Cadre pour la Stratégie pour le Milieu Marin DCSMM**, recommande un suivi des niveaux acoustiques (dans les bandes de tiers d'octave de 63 et 125 Hz), soit par observations réelles, soit par modélisation [EuropeanCommission_2010]. L'implication du trafic maritime dans ces bandes de fréquence est mise en avant dans [Ross_1976, Tasker_2010] pour le trafic hauturier.

Le son étant un élément essentiel pour la vie sous-marine, les écosystèmes sous-marins sont directement concernés par ces perturbations acoustiques liées à l'homme. Cet environnement acoustique peut engendrer un stress des organismes, un masquage des sons produits et perçus par un individu, des changements comportementaux, des pertes d'audition temporaires ou permanentes avec des conséquences létales. Ce constat a amené au besoin de surveillance des niveaux anthropiques. Ainsi, le « bon état écologique » d'un milieu a été défini par la directive européenne **DCSMM**, il induit le suivi de certains indicateurs pour la caractérisation des bruits liés au trafic maritime et des bruits impulsifs. Plusieurs organismes nationaux tels que l'organisme américain la *National Oceanic and Atmospheric Administration* ou l'organisme Allemand *the Federal Maritime and Hydrographic Agency* règlementent les niveaux acoustiques émis par les activités humaines. Le projet AQUO (*Achieve QUIeter Oceans*) conclut sur l'efficacité de méthodes de réduction du bruit sous-marin liée au trafic maritime hauturier [Audaly_2016] et interpelle sur la problématique des environnements côtiers pour lesquels la fréquentation des bateaux n'est pas décrite par le système AIS et ses conséquences sont mal connues.

Le monitoring par acoustique sous-marine passive répond à ce besoin d'observation et de suivi des écosystèmes sous-marins. La propagation des sons étant très favorable dans l'eau, l'acoustique passive permet d'écouter sur de grandes distances : cette méthode n'est pas limitée à une observation en surface ou dans une zone de prélèvement. Non intrusive et discrète, cette méthode a peu d'impact sur la faune et permet d'étudier un environnement sans le perturber. Étant non sélective, une seule prise de mesure permet d'étudier le milieu sous différents aspects. L'acoustique sous-marine permet la surveillance de zones sombres, reculées et difficiles d'accès pour l'homme telles que l'Arctique [Kinda_2013b] et est indépendante des conditions météorologiques ou nocturnes. Des systèmes autonomes permettant l'enregistrement des ondes acoustiques ont été mis au point par différents industriels dont RTSYS, leader français du marché des enregistreurs acoustiques sous-marins. Adaptés aux besoins du monde civil et de la recherche, ces systèmes permettent d'effectuer des suivis acoustiques dans des conditions « extrêmes » d'un point de vue environnemental (zones glacières ou profondes) et d'un point de vue acquisition des données (durée d'écoute pouvant aller jusqu'à plusieurs mois et avec une haute fréquence d'échantillonnage). Dans un objectif de monitoring des chantiers, des systèmes permettant l'évaluation en temps-réel des niveaux acoustiques ont été mis en place.

Thématique et objectifs de la thèse

Peu d'études s'intéressent à l'influence de l'augmentation de l'activité côtière et aux bruits rayonnés par les petites embarcations [Gervaise_2012b]. Les environnements côtiers sont pourtant les pourvoyeurs de 41.7 % des services écosystémiques produits par les océans [Costanza_2014]. Ma thèse intitulée « *Production acoustique d'une flottille côtière : Application au suivi environnemental et à l'identification automatisée de sources sonores anthropiques* » aborde ce problème. A mi-chemin entre le monde académique et le monde industriel, cette thèse répond aux différentes questions scientifiques et industrielles sur la thématique du trafic côtier, en termes de l'étude de son influence dans le paysage acoustique et de capacité à décrire une flottille côtière par acoustique passive (détecter et classifier les embarcations côtières).

La méthodologie scientifique de ce travail de thèse fut de proposer un **protocole d'identification visuelle du trafic maritime côtier** produisant les mêmes données que l'AIS (position, vitesse, taille et type d'embarcation), de définir des méthodes permettant de **caractériser ce trafic côtier**, et de proposer des algorithmes de **détection et de classification des bateaux présents dans cette flottille**. La caractérisation du trafic est réalisée par des descripteurs acoustiques dont le suivi spatio-temporel permet d'identifier l'impact du trafic maritime dans le paysage acoustique de la baie. La détection et la classification sont réalisées après caractérisation individuelle du bruit par un ensemble de paramètres acoustiques et par utilisation d'algorithmes d'apprentissage supervisés. Les travaux présentés dans ce manuscrit sont illustrés sur la **flottille d'embarcations de loisir** présente dans la baie de Calvi (Corse).

Contexte de réalisation

RTsys est une PME morbihannaise d'une trentaine de personnes dont le cœur de métier est la réalisation d'architectures multi-capteurs novatrices. Cette PME conçoit des systèmes dédiés au monde sous-marin dans les domaines de la robotique et de l'acoustique sous-marine. Ces systèmes sont présents dans le secteur de la défense (drone sous-marin pour l'entraînement à la lutte anti-sous-marine, *retrofit* de sonar de frégates), dans le monde industriel (bouées acoustiques de surveillance des chantiers d'implantation d'éoliennes off-shore par battage de pieux, sonar portable pour plongeurs) et dans le secteur de la recherche (enregistreur acoustique 1, 4 et 16 voies synchronisées).

Les travaux présentés dans ce document ont été réalisés dans le cadre d'une **convention CIFRE** entre la société RTsys et le laboratoire Gipsa-Lab, avec un co-financement de l'*Association Nationale de la Recherche et de la Technologie*. Ces travaux ont été dirigés conjointement par C. Gervaise (Institut de Recherche CHORUS) et par R. Bourdon (RTsys). La préparation de cette thèse a eu lieu au sein de l'entreprise RTsys à Lorient, avec un accueil physique et une mise à disposition des outils de travail. Durant ces trois années, j'ai travaillé deux semaines au laboratoire Gipsa-Lab à Grenoble et trois semaines en expérimentations à la station de recherche STARESO à Calvi.

Contenu scientifique du manuscrit de thèse :

Ce manuscrit est organisé en huit chapitres, regroupés en 3 parties, détaillées ci-dessous.

Partie 1 : Contexte d'étude

1. Chapitre 1 : Présentation générale de l'acoustique sous-marine, du paysage acoustique et des sources acoustiques sous-marines et en particulier des bruits rayonnés par les bateaux.
2. Chapitre 2 : Présentation du site d'étude et des différentes bases de données utilisées.

Partie 2 : Caractérisation du trafic maritime côtier pour le suivi environnemental

3. Chapitre 3 : Développement d'un outil de localisation du trafic maritime par traitement d'images.
4. Chapitre 4 : Description du trafic maritime côtier dans le cas spécifique de la baie de Calvi
5. Chapitre 5 : Contribution du bruit induit par la flottille côtière dans le paysage acoustique de la baie de Calvi.

Partie 3 : Reconnaissance acoustique des embarcations d'une flottille côtière par apprentissage supervisé

6. Chapitre 6 : Caractérisation individuelle de bruits rayonnés par la flottille côtière.
7. Chapitre 7 : Descripteurs acoustiques pour la classification de bruits rayonnés par la flottille côtière.
8. Chapitre 8 : Détection et classification par acoustique passive des bruits rayonnés par la flottille côtière.

De nature bibliographique, le **chapitre 1** présente les bases de l'acoustique sous-marine et de la propagation des ondes sonores dans l'eau. L'acoustique sous-marine est le meilleur moyen de transmission sous l'eau et demeure une science très complexe. Les enjeux, les avantages et les contraintes liées au monitoring de l'environnement marin par acoustique passive seront abordés, ainsi que la notion de paysage acoustique. Une attention particulière sera portée sur le bruit rayonné par les bateaux à l'origine de l'antrophonie. L'origine de ces bruits sera présentée, ainsi que la contribution acoustique qu'il engendre : l'apparition d'une composante large bande (principalement dû au phénomène de cavitation) et d'une composante étroite (provoquée par différents systèmes en rotation). Différents modèles permettent de caractériser le bruit rayonné des grandes embarcations. Ce bruit rayonné subit des altérations lors de sa propagation (interférences, Doppler).

Le **chapitre 2** présente le site d'étude choisi pour ces travaux et les bases de données acquises. La baie de Calvi est un site d'une grande richesse écologique soumis durant la saison estivale à une présence très marquée d'une flottille d'embarcations récréatives. Plus de 500 traversées de la baie par des bateaux sont observées chaque jour. Les expérimentations réalisées par CHORUS et STARESO ont permis d'acquérir 530 heures d'enregistrements acoustiques répartis sur 3 périodes : Juillet, Septembre et Octobre. De plus, une expérimentation que j'ai spécifiquement réalisée pour cette thèse a permis l'acquisition de 155 heures de données acoustiques avec en parallèle 64 heures de suivi photographique de la baie. Ce suivi photographique a pour objectif de caractériser le trafic maritime de la baie et d'identifier les bateaux présents. Cinq bases de données ont été construites à partir de cette matière première pour répondre aux problématiques abordées dans les différents chapitres de cette thèse.

L'une des principales contraintes des études acoustiques en milieu côtier est le manque d'information sur le trafic maritime : seul 3.7 % des bateaux traversant la baie de Calvi sont équipés d'un système AIS (*Automatic Identification System*) permettant la surveillance du trafic maritime par la localisation en temps-réel des bateaux. Le **chapitre 3** présente une méthode de localisation et de caractérisation du trafic maritime à partir des photographies de la baie spécifiquement réalisées pour cette étude. Cet algorithme de traitement d'images permet de détecter les bateaux et de localiser chaque pixel de l'image. Le mouvement des bateaux est détecté en appliquant un seuillage local adaptatif. La géolocalisation des pixels utilise une méthode empirique alliant une correction des déformations induites par l'utilisation d'un objectif grand angle et des fonctions de géoréférencement. La localisation d'un bateau spécifique équipé d'un récepteur GPS permet d'estimer les performances de localisation de cet algorithme. Des cartes du trafic maritime ont été réalisées sur différentes échelles temporelles : l'heure, la journée et la semaine. Ces cartes sont alors commentées et comparées à l'observation réalisée sur le terrain.

Les **chapitres 4 et 5** s'intéressent au bruit généré par une flottille côtière et à son impact sur les paysages acoustiques d'un site. Le **chapitre 4** relie les niveaux de bruit à des informations sur le trafic maritime. Selon la définition de NRC 1995, le bruit est caractérisé par deux descripteurs acoustiques : le *Received Level* (RL) associé au bruit océanique et caractérisant les sources individualisables et l'*Ambient Noise Level* (ANL) associé au bruit de fond, caractérisant le niveau ambiant en effaçant toutes sources individualisables. Ces descripteurs permettent d'identifier des informations sur le trafic maritime en termes de distance du bateau le plus proche de l'enregistreur, pour le RL et du nombre de bateaux présents dans un rayon de captation de 500 m pour l'ANL. Le lien avec la bande de fréquence est discuté. Les portées d'écoutes de chaque descripteur sont estimées. Un modèle paramétrique simple permet de relier l'ANL et le nombre de bateaux d'une zone donnée. Le suivi spatio-temporel de ces descripteurs acoustiques est réalisé dans le **chapitre 5** et permet d'évaluer la contribution du trafic maritime estivale dans le paysage acoustique de la baie. Les variabilités temporelles sont étudiées sur trois échelles temporelles : diurne/ nocturne, journalière et saisonnière. L'influence de l'activité benthique et ichtyologique sur les descripteurs acoustiques est observée.

Les **chapitres 6, 7 et 8** s'intéressent au bruit généré par un navire en particulier et abordent sa caractérisation par un ensemble de descripteurs acoustiques puis sa classification. Consacrée à la connaissance et à l'identification des singularités acoustiques des petites embarcations, le **chapitre 6** présentera cette source acoustique dans différents espaces de représentation. Le **chapitre 7** s'intéressera à la caractérisation individuelle des bruits rayonnés des bateaux par un ensemble de descripteurs acoustiques. La comparaison des distributions des descripteurs acoustiques et des paramètres descriptifs du bateau permet d'établir une arborescence de classification. Le **chapitre 8** présente un algorithme de détection et de classification des bruits rayonnés de petites embarcations par une méthode supervisée. Ce classificateur est alimenté par les différents descripteurs définis précédemment.

Contributions originales de la thèse :

Le **chapitre 1** est de nature **bibliographique** et vise à fournir les éléments de base nécessaires à la compréhension de ce manuscrit et à identifier l'origine du bruit rayonné par les bateaux étudiés par la suite. Le **chapitre 2** est de nature **contextuelle** (présente le site d'étude et des expérimentations terrain spécifiques) et préparatoire (création des bases de données utilisées dans ce manuscrit).

Les contributions originales de cette thèse se trouvent dans les chapitres 3 à 8. Le **chapitre 3** présente une méthode simple de traitement d'images, absente dans la littérature concernant le trafic maritime, innovante par son application : la cartographie du trafic maritime. Les originalités présentes dans les chapitres 4 à 7 sont liées au contexte d'étude. Les études de bruits rayonnés de bateaux, réglementations et modèles de bruits rayonnés s'intéressent majoritairement aux grandes embarcations de commerce dans un contexte hauturier, et très marginalement aux petites embarcations de plaisance dans un contexte côtier. Dans le **chapitre 4**, le lien entre des descripteurs acoustiques du trafic maritime et les paramètres descriptifs du trafic maritime (suggérés dans quelques études sur des bateaux de commerce [Haxel_2013, Buckstaff_2004]) est clairement établi dans un contexte côtier d'embarcations de plaisance. Dans le **chapitre 5**, l'analyse statistique des données acoustiques a fait ressortir de façon intéressante et surprenante la contribution du bruit du trafic maritime dans la baie. Une partie de ces résultats a fait l'objet d'une publication [Magnier_2016a] et d'une présentation dans un congrès international [Magnier_2016b]. Les **chapitres 4 et 5** présentent des outils généralisables pour tous les sites côtiers et les résultats obtenus dans la baie de Calvi. L'analyse conjointe des **chapitres 4 et 5** permet alors de décrire un protocole permettant la définition des descripteurs acoustiques, de suivi environnemental, spécifiques à chaque zone d'étude. Ce protocole se compose d'une étude de corrélation trafic maritime / acoustique / données météorologiques (chapitre 4) suivie d'une étude spatio-temporelle d'une sélection de descripteurs (chapitre 5). Au niveau de la caractérisation individuelle des bruits rayonnés, le **chapitre 6** apporte un nouveau regard sur l'analyse des bruits rayonnés en proposant une analyse dans des espaces de représentation peu utilisés par la communauté de l'acoustique sous-marine. Le **chapitre 7** permet de caractériser cette source sonore à travers un choix des descripteurs issus de la littérature de détection et classification de grandes embarcations, d'avions, de véhicules motorisés et de genres musicaux. Cette étude a permis de définir une arborescence originale pour la classification acoustique d'embarcations côtières. Les **chapitres 7 et 8** utilisent une méthode de classification supervisée couramment utilisée en traitement de parole, mais trouvant son originalité dans l'application faite et dans le choix des paramètres descripteurs.

Partie 1 : Contexte d'étude

Les travaux présentés dans ce manuscrit s'intéressent à la production sonore des embarcations d'une flottille côtière. Avant de rentrer plus en détail dans ce sujet et de présenter les productions scientifiques réalisées au cours de cette thèse, une présentation de l'acoustique sous-marine et du site d'étude est réalisée. Cette partie est composée de deux chapitres.

Le **chapitre 1** présente le contexte général de l'étude : le monitoring par acoustiques sous-marine passive ainsi que les différents contributeurs du paysage acoustique. Une attention particulière est portée sur les bruits rayonnés par les bateaux. Les problématiques liées à ce sujet seront abordées.

Le **chapitre 2** présente le contexte spécifique des travaux réalisés, en termes de zone d'étude ainsi que des bases de données recueillies spécifiquement pour alimenter cette thèse.

1 Chapitre 1 : Du paysage acoustique au bruit rayonné par les navires

Sommaire

1.1	La propagation des sons dans un milieu marin.....	10
1.2	Le monitoring par acoustique sous-marine.....	11
1.3	Le paysage acoustique.....	12
1.3.1	La géophonie	13
1.3.2	La biophonie	13
1.3.3	L'anthropophonie.....	15
1.4	Les questionnements autour du bruit rayonné des bateaux.....	17
1.5	Le bruit rayonné par les bateaux.....	19
1.5.1	L'origine du bruit	19
1.5.2	Les effets liés à la propagation des ondes acoustiques d'un bateau en mouvement ..	23
1.5.3	Les modèles de bruits rayonnés par les bateaux	24
1.5.4	La standardisation de mesure de bruits rayonnés	27
1.5.5	Impact du bruit rayonné par les bateaux sur la vie aquatique	27
1.6	Conclusion	28

De nature bibliographique, ce premier chapitre présente les bases de l'acoustique sous-marine, les enjeux, les avantages et les contraintes liées au monitoring de l'environnement marin par acoustique passive, ainsi que les différentes sources constituant le paysage acoustique. Une attention particulière sera portée sur le bruit rayonné par les bateaux et son origine. Différents modèles décrivent ce bruit. Les effets subis par les ondes acoustiques lors leur propagation et les conditions normatives conseillées pour la mesure de bruit rayonné sont également abordés. Une attention sera portée sur les différents questionnements liés à l'étude du bruit rayonné par les bateaux et aux problématiques de cette thèse.

1.1 La propagation des sons dans un milieu marin

Les ondes acoustiques, ou ondes sonores, correspondent à la propagation de perturbations mécaniques dans un milieu élastique. Dans le cas présent, il s'agit de la propagation d'onde de compression dans un milieu fluide. Cette vibration mécanique crée une variation de pression, plus précisément une surpression, qui se propage sous forme d'ondes longitudinales grâce à la déformation élastique du fluide. Les ondes acoustiques se propagent plus rapidement dans l'eau ($c_{eau} = 1500 \text{ m/s}$) que dans l'air ($c_{air} = 340 \text{ m/s}$). Liée à la température, la salinité et l'immersion de la source, cette vitesse de propagation dans l'eau évolue en fonction des saisons, des zones géographiques et au sein même de la colonne d'eau [Erbe_2010]. Les variations de vitesse au sein de la colonne d'eau provoquent des phénomènes de réfraction induisant des changements de direction. Ainsi, la présence de variation (d'un minimum ou / et d'un maximum) au sein du profil de célérité provoque l'apparition de zone de convergence et des zones d'ombres (Figure 1).

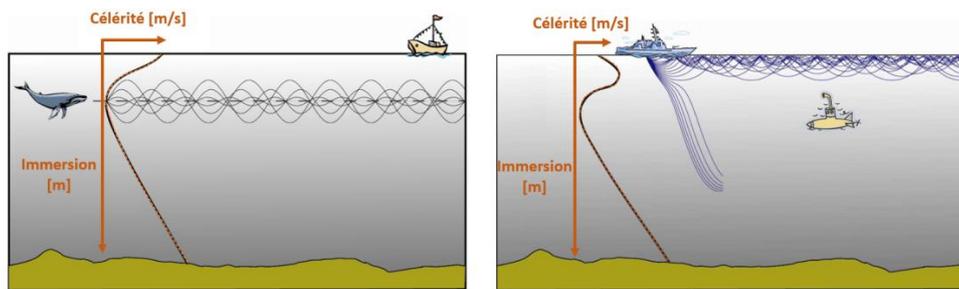


Figure 1: Propagation des ondes acoustiques en fonction du profil de célérité. Source [Erbe_2010]

Contrairement aux ondes électromagnétiques qui subissent une très forte atténuation due à l'absorption et à la diffusion, les ondes acoustiques sont adaptées pour l'environnement marin. Ces ondes se propagent sur de longues distances et constituent le meilleur moyen de transmission sous l'eau. Les pertes de propagation des ondes acoustiques sont principalement liées à deux phénomènes :

- Les pertes géométriques caractérisent la conservation de l'énergie lors la propagation de l'onde : $TL_{geo} = Coeff_{géo} \cdot \log_{10}(D)$ (Equation 1) avec D la distance de propagation exprimée en m et $Coeff_{géo}$, le coefficient caractérisant les pertes géométriques. Dans un milieu profond, l'onde subit une déformation uniforme dans toutes les directions, elle est qualifiée de sphérique : $Coeff_{géo}$ vaut 20 [Brooker_2016]. En milieu peu profond, la propagation de l'onde est contrainte par la surface de l'eau et le sol. On parle alors de propagation cylindrique. En théorie, un $Coeff_{géo}$ de 10 est attendu [Chaitanya_2011], mais plusieurs retours terrain ont montré la possibilité d'avoir un coefficient de 15 [Lossent_2017] ou d'observer une combinaison de deux types de pertes géométriques : pertes sphériques proches de la source et des pertes cylindriques lorsque la distance est supérieure à la hauteur d'eau ($10 \cdot \log_{10}(D) + 10 \cdot \log_{10}(H)$ avec H la hauteur d'eau) [Erbe_2010].

- Les pertes par absorption moléculaire correspondant aux pertes par frottement dues à la viscosité de l'eau et à l'absorption moléculaire de l'acide borique et du sulfate de magnésium dans l'eau : $TL_{abs} = \alpha \cdot \frac{D}{1000}$ (Équation 1) avec D la distance de propagation exprimée en m et α le coefficient d'absorption moléculaire exprimé en dB/Km. Ce coefficient dépend de la fréquence de l'onde, de l'immersion et des paramètres physico-chimiques : température, salinité, et pH. Ce coefficient peut être estimé en utilisant la formule de *François Garrison* [Francois_1879 a et b], ou pour des zones spécifiques, la formule de *Thorp* [Thorp_1967] (Atlantique) ou de *Leroy* [Leroy_1981] (méditerranée).

Les ondes acoustiques sont aussi soumises aux phénomènes de réflexion et de transmission, régis par les lois de *Snell Descartes*. Les coefficients de réflexion et de transmission dépendent de la nature et de la rugosité de l'obstacle. A cette propagation complexe s'ajoutent d'autres phénomènes tels que la présence de multi-trajets et l'apparition de figures d'interférence. Des modèles permettent d'estimer les pertes de propagation. Ces modèles se basent sur la résolution de l'équation d'Helmholtz en utilisant différentes méthodes telles que la théorie des rayons (Bellhop [Porter_1987]), les équations de modes normaux (Kraken [Porter_2001]) et les équations paraboliques (RAM [Collins_1993]). Chaque méthode a une validité fixée par la fréquence de l'onde sonore étudiée et le type de milieu (eau profonde, eau peu profonde). La propagation des ondes acoustiques au sein du milieu océanique est donc une science complexe, mais reste le meilleur moyen de transmission sous l'eau.

1.2 Le monitoring par acoustique sous-marine

La caractérisation et la surveillance du milieu marin sont réalisées par acoustique active ou passive. Dans le mode « actif », une onde acoustique connue est émise. Cette onde se propage dans le milieu, rencontre un obstacle et est réfléchi vers l'émetteur. L'analyse de l'onde réfléchi et des différents échos, en termes de différence de temps de propagation et de puissance reçue, permet de renseigner et de caractériser l'environnement avoisinant. Utilisée par les mammifères-marins pour se localiser et détecter leurs proies, l'acoustique active a été adaptée par l'homme et appliquée à plusieurs domaines d'étude. Ainsi, cette technique permet d'étudier le fond marin sous différents aspects : la cartographie de la bathymétrie des océans et le positionnement par rapport au fond marin [Diosi_2005, Henthorn_2007], l'étude des couches sédimentaires en termes de nature et d'épaisseur et l'étude géophysique permettant la localisation de réservoirs de pétrole et de gaz [Cobb_2011, Williams_2015]. La mesure par acoustique active des distorsions provoquées par le canal de propagation (la tomographie acoustique océanique) renseigne sur des paramètres physiques de la colonne d'eau tels que le courant et la température de l'eau [Kostaschuk_2005, Rennie_2010]. L'acoustique active permet d'identifier et de localiser des cibles telles qu'un sous-marin dans un contexte militaire ou bien un banc de poisson dans le cadre de la pêche. Cette méthode de caractérisation du milieu marin est toutefois intrusive et lorsque les niveaux des ondes émises sont trop conséquents, impacte fortement la faune allant jusqu'à l'échouage massif de cétacés [Fernández_2005, Filadelfo_2009].

Le monitoring par acoustique passive (PAM) consiste à écouter les sons présents dans un milieu (marin ou aérien [Parks_2014]). Non intrusive et discrète, cette méthode a peu d'impact sur la faune et permet d'étudier un environnement sans le perturber. Dans le milieu marin, cette écoute est réalisée en déployant un ensemble composé d'un système d'acquisition (enregistreurs acoustiques) et d'un ou plusieurs capteurs permettant de transformer les variations de pression acoustique en un signal électrique (hydrophone, antenne acoustique, antenne optique [Peigné_2016], etc.). La mise en œuvre de ces systèmes est simple et rapide. Ces enregistreurs acoustiques réalisent des enregistrements continus sur de longues périodes, allant de quelques jours à plusieurs mois d'acquisition. Ainsi, le PAM permet d'obtenir des informations sur un environnement avec une haute résolution temporelle. Cette acquisition peut être réalisée en temps réel pour les systèmes côtiers. La propagation des sons étant

très favorable dans l'eau, l'acoustique passive permet d'écouter sur de grandes distances. De plus, l'utilisation de réseau de capteurs [Sutin_2013a] ou de systèmes dérivants [Lossent_2017] augmente les résolutions spatiales d'observation. Un système autonome peut être déployé dans des zones reculées et difficiles d'accès telles que l'Arctique [Kinda_2013b]. Cette méthode est non sélective : l'ensemble des sons présents sous l'eau dans les limites fréquentielles du système d'acquisition sont recueillis. Une seule prise de mesure permet d'étudier le milieu sous différents aspects. Ainsi, le PAM est une méthode de monitoring présentant un faible rapport coût par rapport à la quantité de données.

L'acoustique sous-marine répond alors à un besoin d'écoute du milieu. Dans un cadre de défense, le monitoring par acoustique passive permet d'étudier l'environnement tout en limitant les indiscrétions acoustiques liées aux émissions actives. Cette méthode est fortement appréciée lors d'une surveillance furtive d'un milieu, entre autres par les sous-marins, ou pour l'identification des signatures acoustiques des différentes cibles et bateaux voisins. Dans le domaine civil, le PAM est utilisé dans de nombreux domaines. L'utilisation de sources d'opportunité, telles que le bruit rayonné par un bateau [Gervaise_2012a] ou les vocalises de mammifères marins [Gervaise_2007, Barazzutti_2013] permet aussi de caractériser la propagation au sein d'un milieu par tomographie passive et de réaliser une inversion géo-acoustique. D'un point de vue industriel, le PAM permet de comprendre et de surveiller l'effet des activités humaines, telles que le trafic maritime [Buckstaff_2004, Gervaise_2012b], le battage de pieux [Bailey_2010] et la prospection sismique [Gordon_2003] sur la biocénose [Popper_2003]. Les éthologues utilisent l'acoustique passive pour le recensement des espèces de mammifères marins [Roy_2010, Marques_2013] et de poissons [Lowerre-Barbieri_2008, Luczkovich_2008, Parmentier_2017, Di Iorio_2018] ainsi que pour comprendre les migrations et mouvements de population, l'occupation de l'habitat et l'identification des lieux de reproduction. Les bio acousticiens étudient les mécanismes de production du son et leur utilisation au quotidien par la biocénose [Lovella_2006, Wahlberg_2011]. Dans le cadre de surveillance de mammifère marin, contrairement aux expéditions classiques, cette méthode de monitoring permet une surveillance nocturne indépendante des conditions climatiques et non limitée à une observation en surface ou dans la zone de prélèvement. Dans le cadre de l'écologie acoustique, la production sonore de certains organismes benthiques (crevettes, bivalves) [Di Iorio_2012] est utilisée comme indicateur de la santé de l'environnement [Coquereau_2015]. Plus récemment, le PAM a été utilisée pour étudier le transport sédimentaire en rivière [Geay_2017].

Le monitoring par acoustique sous-marine passive présente cependant certaines contraintes. Aux contraintes liées à la propagation présentées dans la section 1.1, s'ajoutent celles liées au contexte passif de l'étude (peu d'information des sources sonores) et aux signaux sources (grande diversité). Le PAM permet d'enregistrer une quantité importante de données brutes sans information sur les instants d'émission, ni sur l'identité et la localisation de la source. L'ensemble des sources sous-marines regroupe une diversité de signaux pouvant se superposer, être soumis à une directivité et au mouvement de la source (effet Doppler, [Josso_2009]). En l'absence d'algorithme automatique pour sélectionner une information ciblée, l'analyse par acoustique passive passe par une étape obligatoire et chronophage d'annotations manuelles des bases de données. La mise au point d'algorithmes de classification de données s'impose pour pouvoir exploiter pleinement le potentiel de le PAM.

1.3 Le paysage acoustique

Le monitoring par acoustique passive permet d'étudier le paysage acoustique. Celui-ci varie dans le temps et l'espace [Lobel_2010, Erbe_2015, Guan_2015] et est défini par l'ensemble de sources sonores présentes à un instant et un emplacement donné [Pijanowski_2011]. Les sources sonores peuvent être classées en 3 catégories : la géophonie qui regroupe les sons produits par les conditions météorologiques et les événements géophysiques, la biophonie qui représente les sons provenant de l'activité biologique et l'anthropophonie qui correspond aux sons produits par l'activité humaine.

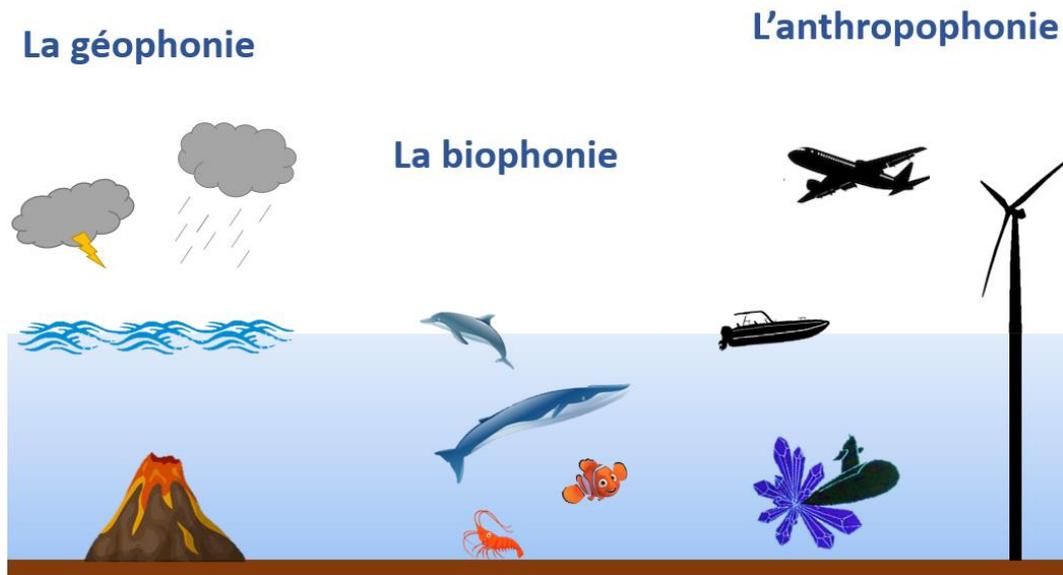


Figure 2 : Les différentes composantes du paysage acoustique

1.3.1 La géophonie

Le terme de géophonie désigne l'ensemble des sons produits par des phénomènes physiques naturels [Krause_1987]. Dans le cadre de l'acoustique sous-marine, ces phénomènes font référence aux phénomènes météorologiques, aux phénomènes sismiques et dans les régions polaires, aux phénomènes liés à l'évolution de la banquise. Les contributeurs principaux à la géophonie sont les phénomènes météorologiques et plus particulièrement la présence de vent. En effet, l'état de mer (défini par le niveau de vent selon l'échelle de Beaufort est lié à la taille des vagues) est l'élément le plus influent de la géophonie sur le paysage acoustique dans la bande 500 Hz à 10kHz [Ma_2005, Mathias_2016]. De plus, pour des milieux en petit fond, le vent a une influence importante sur le paysage acoustique de 10 à 100 Hz [Wenz_1962]. Le bruit induit par les précipitations et les vagues se retrouve dans la bande de fréquences de 0 à 100 kHz [Ma_2005, Demoulin_2010, Erbe_2014]. Les sons d'origines sismiques dues aux séismes et aux éruptions volcaniques sous-marines apportent leur contribution au paysage acoustique dans les basses-fréquences de 0 à 100 Hz [Wenz_1962]. Le paysage acoustique des zones polaires est fortement marqué par les phénomènes liés à la banquise ; sous l'action du vent et de l'élévation des températures, des fissures apparaissent dans la glace. Acoustiquement, ces craquements se traduisent par la production variée de bruits dans la bande de 10 Hz à 10 kHz : bruits impulsionnels, bruits large bande et modulation de fréquence [Kinda_2013b, Kinda_2015]. La Figure 5 synthétise l'ensemble de ces informations. Une modélisation du bruit ambiant en fonction de l'état de mer est réalisée par [Wenz_1962]. Le bruit ambiant est alors défini au-dessus de 200 Hz et présente un maximum pour une fréquence de 500 Hz suivi d'une décroissance logarithmique en fonction de la fréquence. Les courbes de bruit ambiant sont présentes sur la Figure 5 (page 16) ainsi que les observations basses fréquences réalisées par [Cato_2008] en Australie.

1.3.2 La biophonie

L'activité biophonique est due aux productions sonores volontaires et involontaires des organismes biologiques : les mammifères marins, les poissons et la population benthique.

Les mammifères marins émettent volontairement deux types de productions sonores : des impulsions, appelées clics d'écholocation et des modulations de fréquence appelées sifflements, vocalises, chants, etc. Les impulsions sonores sont exclusivement émises par les odontocètes. Les clics d'écholocation correspondent à des bruits large bande de très courte durée dont la fréquence centrale et la durée

dépendent de l'espèce observée variant temporellement de 50 μ s pour les Bélougas [Au_1985] à 10 ms pour les Cachalots [Madsen_2002] et fréquemment de 15 kHz pour le Cachalot [Madsen_2002] à 140 kHz pour le Marsouin Commun [Au_1993]. A l'image du sonar, les bruits impulsifs permettent d'identifier la distance entre l'émetteur et un récepteur réfléchissant l'onde sonore. L'émission des clics permet alors aux mammifères marins de se repérer dans la colonne d'eau, d'identifier les obstacles et de chasser leurs proies mais aussi pour certaines espèces de communiquer entre les différents individus [Clausen_2011]. Des modulations de fréquence sont produites par la plupart des cétacés. Ces bruits permettent la communication entre différents individus. Les caractéristiques des modulations, durées, largeur de bande et fréquences centrale dépendent de l'espèce considérée et de son activité (Figure 3). La durée des modulations varie de 0,01 à 2 secondes chez les odontocètes et de 0,02 à 10 secondes chez les mysticètes. D'un point de vue fréquentiel, les modulations varient de 10 Hz pour la baleine bleue à plus de 20 kHz pour les Dauphins [Mellinger_2007].

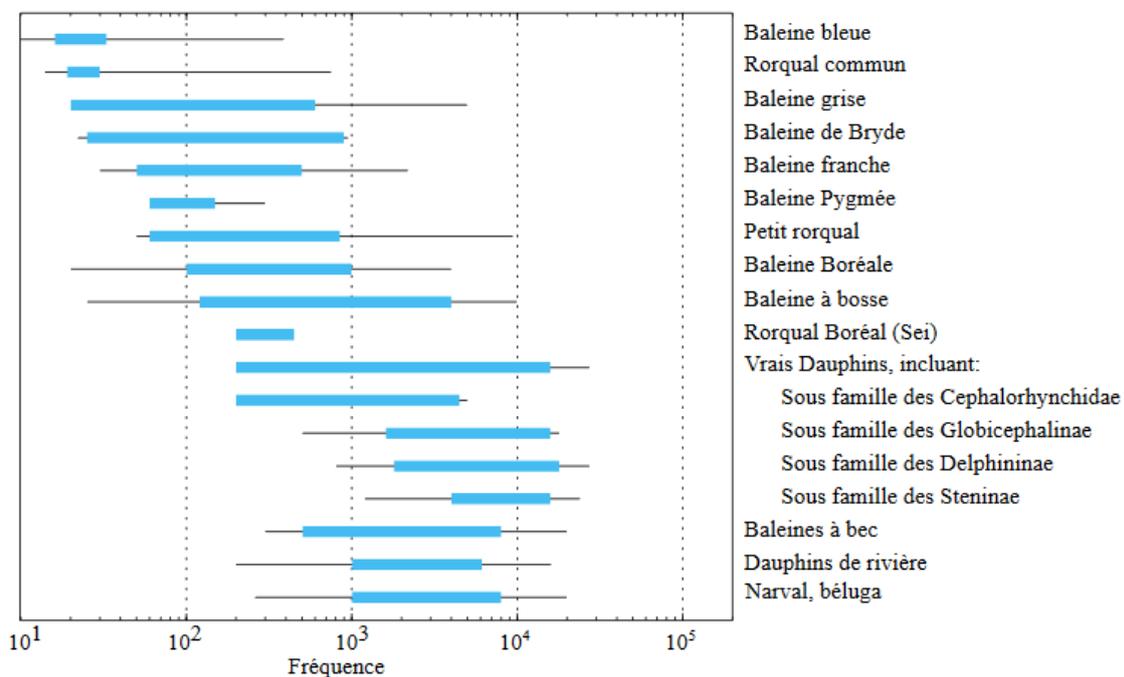


Figure 3 : Gamme de fréquence des vocalises de mysticètes et des sifflements d'odontocètes. Source [LeBot_a_2015]

Les poissons contribuent eux aussi à la production sonore composant la biophonie. Plus de 700 espèces sonifères de poissons ont été recensées [Luczkovich_2008]. Cette production peut être volontaire, liée à la défense du territoire, à la communication, à la reproduction ou la sélection de leur habitat [Bas_1990], ou encore involontaire liée à l'alimentation. Ces sons sont émis par différents mécanismes de vibration et de stridulation tels que les vibrations musculaires de leur vessie natatoire, de leurs tendons ou de l'ensemble de leur corps, des stridulations de dents, du squelette et des épines des nageoires pectorales ou dorsales [Ladich_2014]. Ces bruits se retrouvent principalement dans la bande de fréquence de 100 Hz à 1,4kHz et prennent différentes formes. Certaines espèces de poissons telles que la vipère des mer *Nérophis ophidion* produisent une série de 10 à 40 impulsions rythmées suite à la contraction de la vessie natatoire [Parmentier_2010]. D'autres espèces, telles que le poisson crapaud, produisent des modulations de fréquence avec présence de nombreux « pseudo-harmoniques » [Amorim_2006, Di Iorio_2018].

Le benthos est composé des différents organismes biologiques vivant sur le fond de l'océan. Parmi cette population benthique certains produisent involontairement des sons lors de leurs déplacements,

leur alimentation, leur respiration comme les crustacés, les mollusques et les échinodermes. La crevette claqueuse est le principal contributeur de la biophonie dans les milieux côtiers de petit fond des eaux tempérées [Cato_1992]. L'ouverture rapide d'une de leur pince hypertrophiée crée une bulle d'air qui à la fermeture de leur pince éclate en provoquant un bruit impulsionnel allant jusqu'à 100 kHz [Schmitz_2002].

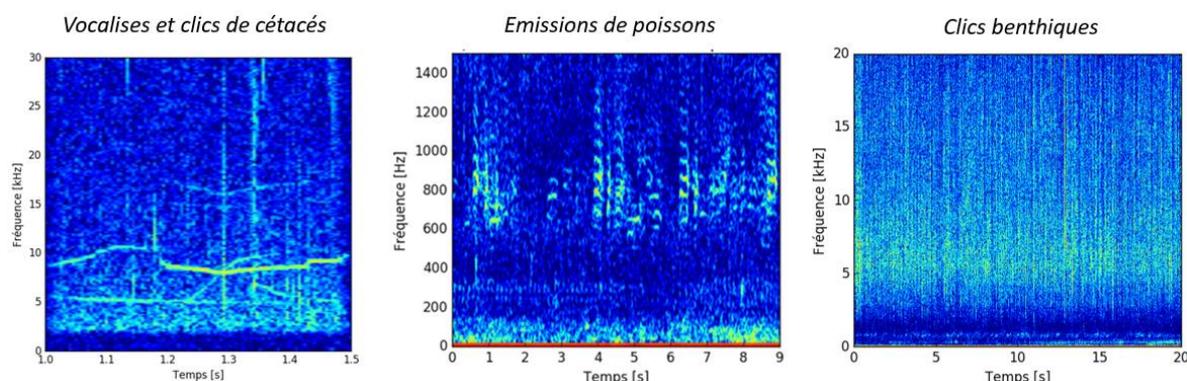


Figure 4 : Spectrogramme de vocalises et clics de cétacés (à gauche), d'émissions réalisées par des poissons (au centre) et de clics benthiques (à droite)

1.3.3 L'anthropophonie

Les bruits qualifiés d'anthropophoniques correspondent au bruit généré par l'homme. Ces bruits sont produits par différents types d'activités telles que la navigation et l'off-shore. Cette activité anthropophonique peut être divisée en deux catégories : les bruits impulsionnels et les bruits continus. Parmi les bruits impulsionnels figurent entre autres les émissions produites par les sonars et sondeurs de bateaux, les bruits d'explosions sous-marines, l'émission d'air guns lors de la prospection sismique et les bruits de battage de pieux lors de la construction de parcs d'éoliennes offshores. Le bruit continu fait référence au bruit rayonné par les bateaux de surface et les sous-marins, les hydroliennes et éoliennes. La Table 1 présente les niveaux associés à différents types de source.

Sound source	Source level (dB re 1 μ Pa @ 1 m)	Power (W)	Total energy per pulse (J)	Bandwidth $\Delta = 10$ dB (Hz)	Source direction	Pulse duration (s)
Ship shock trial (10000 lb explosive)	304	0.021×10^{15}	0.042×10^{15}	0.5–50	Omni	2
Torpedo MK-46 (98 lb explosive)	289	0.66×10^{12}	0.066×10^{12}	10–200	Omni	0.1
Air-gun array	260	0.21×10^9	6.2×10^6	5–300	$60 \times 180^\circ$ V	0.03
US Navy 53C ASW sonar	235	0.77×10^6	1.5×10^6	2000–8000	$40 \times 360^\circ$ H	2
SURTASS LFA sonar	235	0.59×10^6	0.029×10^9	100–500	$30 \times 360^\circ$ H	6–100
Pile-driving 1000 kJ hammer	237	0.46×10^6	0.023×10^6	100–1000	$15 \times 360^\circ$ H	0.05
Multibeam sonar deep-water EM 122	245	0.077×10^6	760	11 500–12 500	$1.0 \times 120^\circ$ V	0.01
Seal bombs (2.3 g charge)	205	2.6×10^3	79	15–100	Omni	0.03
Multibeam sonar shallow EM 710	232	2.2×10^3	4.5	70 000–100 000	$0.5 \times 140^\circ$ V	0.002
Sub-bottom profiler SBP 120	230	2.1×10^3	210	3000–7000	$3 \times 35^\circ$ V	0.1
Acoustic harassment device	205	1.3×10^3	330	8000–30 000	$90 \times 360^\circ$	0.15–0.5
Cargo vessel (173 m length, 16 knots)	192	66	–	40–100	$80 \times 180^\circ$	CW
Acoustic telemetry SIMRAD HTL 300	190	42	–	25 000–26 500	$90 \times 360^\circ$	CW
Small boat outboard engine (20 knots)	160	42×10^{-3}	–	1000–5000	$80 \times 180^\circ$	CW
Acoustic deterrent device	150	4.2×10^{-3}	1.4×10^{-3}	5000–160 000	$90 \times 360^\circ$	0.2–0.3
Operating windmill turbine	151	2.6×10^{-3}	–	60–300	$15 \times 360^\circ$ H	CW

Table 1 : Caractéristique de sources anthropiques avec Omni : omnidirectionnel ; CW : bruit continu ; V : vertical ; H : horizontal ; 10 000 lb = 4536 kg ; 98 lb = 44 kg extrait de [Hildebrand_2009]

Le principal contributeur du bruit anthropophonique reste toutefois le bruit rayonné par les bateaux. Depuis les années 1970, l'augmentation du trafic maritime a provoqué dans certaines zones, une augmentation du bruit ambiant de plus de 10 dB dans la bande 25-40 Hz [Andrew_2002, Kinda_2013]. [Wenz_1962] propose une modélisation du bruit ambiant lié au trafic maritime en fonction d'un indice

de trafic et du type de zone étudiée (petit ou grand fond) [Figure 5]. Les courbes présentent une décroissance logarithmique en fonction de la fréquence.

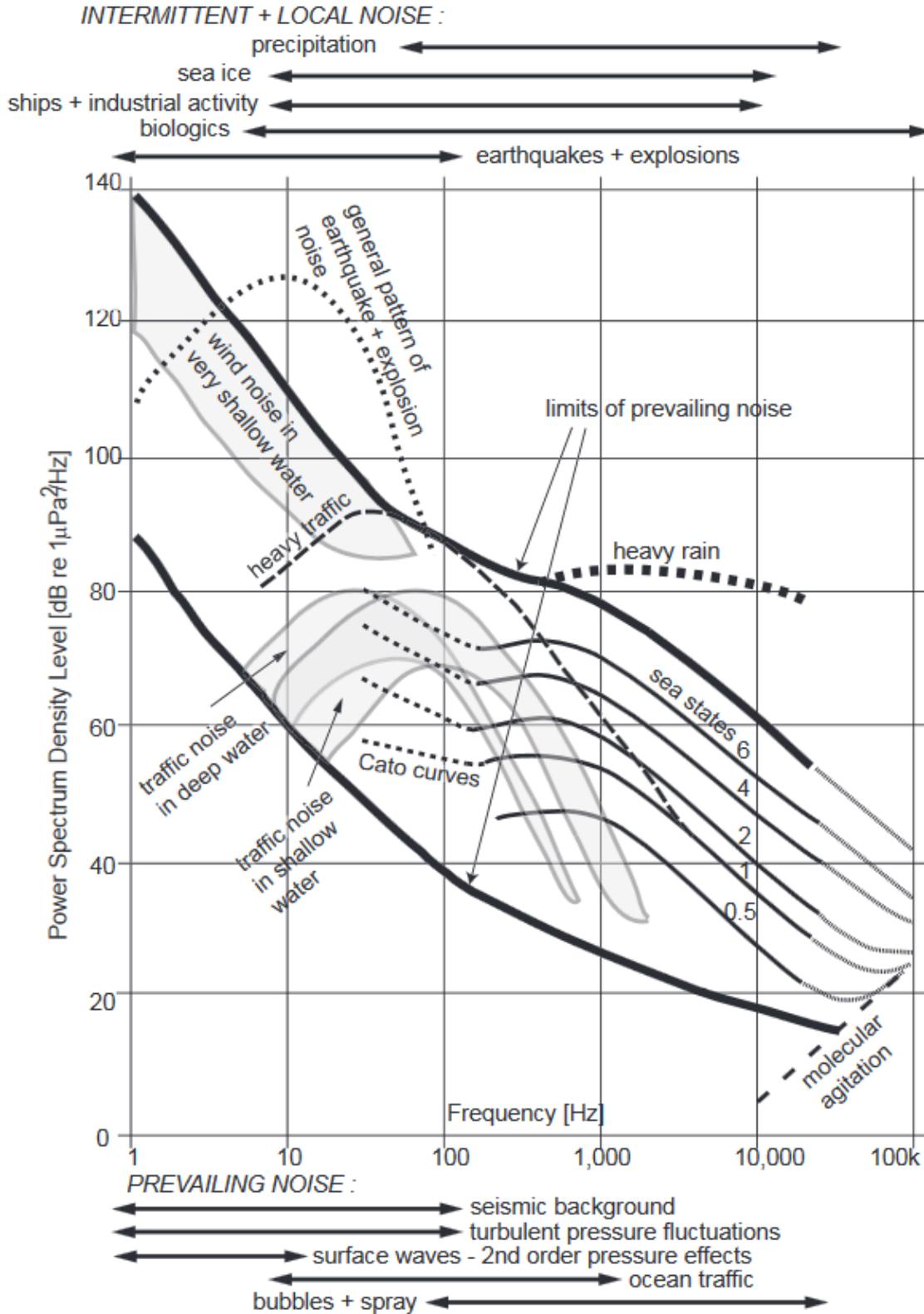


Figure 5 : Modélisation du bruit ambiant selon [Wenz_1962] – Source : [Erbe_2010]

1.4 Les questionnements autour du bruit rayonné des bateaux

Les premières études sur les bruits rayonnés des bateaux par acoustique passive ont été réalisées dans le domaine militaire lors de la seconde guerre mondiale puis de la guerre froide. Le but étant de pouvoir modéliser ces bruits, pour permettre de détecter et d'identifier d'éventuelles cibles, tout en évitant d'être repéré. A ce jour, la maîtrise de l'acoustique sous-marine passive reste un atout majeur dans le domaine militaire, particulièrement pour les sous-marins. Parallèlement, depuis les années 1990, le trafic maritime est en très forte croissance. En 2015, l'analyse d'images satellitaires a montré que l'augmentation était de l'ordre de 300 % pour l'océan indien et comprise entre 100 % et 200 % pour l'Atlantique nord, le Pacifique nord et la Méditerranée. En 2015, 80 % du commerce mondial en volume est acheminé par voie maritime et un fort développement des activités littorales est observé. Cette forte augmentation du trafic maritime a amené à s'interroger sur le problème de la pollution sonore. Aux latitudes moyennes, le niveau sonore induit par le trafic maritime augmente en moyenne de 3 dB tous les 10 ans.

L'étude par acoustique passive des bruits rayonnés par les bateaux suscite un vif intérêt dans la communauté scientifique et militaire. L'une des premières questions abordées lors de l'étude par PAM est la méthode de caractérisation des sources : les sources sont-elles considérées en tant qu'entité individuelle (caractérisation du bruit rayonné individuelle de chaque bateau) ou en tant qu'entité collective (caractérisation du bruit rayonné par le trafic maritime) ? A cette question sur la considération de la source sonore s'ajoutent différentes thématiques d'études : l'évaluation de la production sonore individuelle ou collective, la modélisation de bruit, l'influence sur la biocénose et l'aspect réglementaire. La Figure 6 présente une liste non-exhaustive des différents questionnements liés à l'étude des bruits rayonnés par les bateaux présents dans la littérature.

Une sélection de questionnements a été retenue pour la suite de ces travaux :

- *Quels descripteurs acoustiques sont les plus adaptés pour le monitoring acoustique d'un environnement côtier et quelles informations apportent-ils sur le trafic maritime ?*
- *Quelle est la part anthropophonique dans le budget acoustique des environnements côtiers ?*
- *Existe-t-il des différences acoustiques entre les petites embarcations et comment peut-on classer acoustiquement cette flottille ?*
- *Ces différences peuvent-elles être caractérisées par des descripteurs acoustiques et exploitées dans un objectif de détection et de classification automatisés ?*

Ainsi, différentes notions seront abordées dans cette thèse : la définition de descripteurs acoustiques caractérisant le bruit du trafic maritime (Chapitre 4), la modélisation des bruits rayonnés par le trafic (Chapitre 4), son influence dans le paysage acoustique (Chapitre 5), la description et caractérisation individuelle de bruits rayonnés (Chapitre 6, 7) ainsi que la détection et la classification automatiques (Chapitre 8). Des éléments de réponse, concernant le questionnement sur l'influence du trafic côtier sur la biocénose et la modélisation du bruit rayonné, seront apportés en discussion finale.

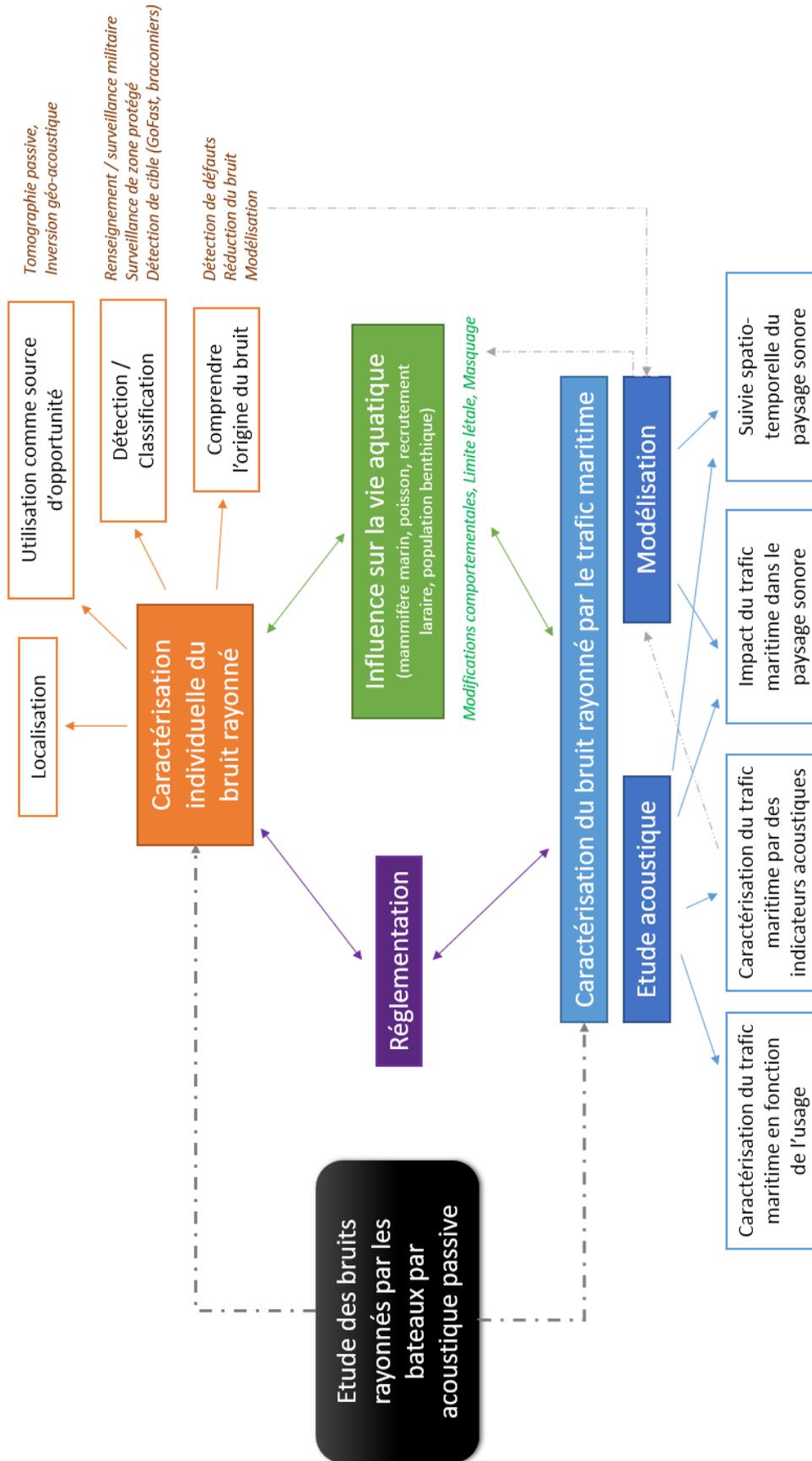


Figure 6 : Questionnements liés à l'étude par acoustique sous-marine passive des bruits rayonnés par les bateaux

1.5 Le bruit rayonné par les bateaux

1.5.1 L'origine du bruit

D'un point de vue physique, le bruit rayonné par les bateaux trouve son origine dans la combinaison de deux types de sources : les sources hydrodynamiques et les sources vibroacoustiques. Les sources hydrodynamiques sont générées par l'écoulement d'un fluide sur le bateau, alors que les sources vibroacoustiques sont induites par des éléments propres du bateau.

Les sources vibroacoustiques sont induites par les sources excitatrices produisant des vibrations sur la carène. Les sources excitatrices peuvent être de nature acoustique (le bruit généré par le moteur), vibratoire (éléments du moteur pour les bateaux à moteur in-bord) ou hydrodynamique (brisure de la vague d'étrave). Des ondes acoustiques sont alors propagées dans l'eau par vibration de la carène (partie immergée de la coque). Les vibrations sont généralement atténuées mais en fonction de la fréquence propre de résonance de la structure, elles peuvent être amplifiées.

A l'inverse, dans le cas des sources hydrodynamiques, l'interaction due à l'écoulement de l'eau sur la structure produit des ondes acoustiques se propageant dans le milieu. Les sources sont créées lors de la mise en mouvement du bateau (la brisure de la vague d'étrave et des bulles transportées dans le sillage du bateau) ou par le système de propulsion (écoulement du fluide le long des pales des hélices et éclatement des bulles de cavitation). La source de bruit hydrodynamique majeure est l'éclatement des bulles de cavitation.

D'un point de vue acoustique, la combinaison des sources permet de caractériser le bruit rayonné par les bateaux en considérant deux aspects fréquentiels. L'éclatement des bulles provoque l'apparition d'un bruit sur une bande de fréquence large, appelé bruit large bande. Les différents éléments en rotation provoquent l'apparition d'un bruit à une fréquence particulière, appelé bruit en bande étroite ou tonale. Le bruit rayonné par un bateau correspond alors à l'addition des deux types de sources fréquentielles. Parallèlement à ces deux types de sources continues, des bruits transitoires sont émis volontairement par les bateaux (sondeur bathymétrique, sonar actif des navires militaires et sonar de pêche) ou involontairement (chocs sur la coque, claquement de portes, craquement de coque pour les sous-marins, claquement de la coque sur l'eau pour les jet-skis).

Le bruit large bande est induit par l'écoulement d'un fluide sur un objet lors de sa mise en mouvement ou par le système de propulsion et se traduit principalement par la brisure de la vague d'étrave, l'apparition d'écoulement turbulent et l'éclatement de bulles de cavitation.

Les bruits observés sont de type « bosse de bruit » : le spectre augmente logarithmiquement jusqu'à une fréquence maximale, puis diminue de manière logarithmique en fonction de la fréquence [Oudompheng_2015]. Par exemple, le bruit provoqué par la brisure de la vague d'étrave par une source de type bosse de bruit dont la fréquence maximale est située autour des 1000 Hz [Dean_1997, Dean_2010]. De même, l'apparition d'un écoulement turbulent crée l'apparition de différents types de sources de bruit : l'impact de la turbulence sur le bord d'attaque des pales ou un appendice du bateau et la présence de lâchers tourbillonnaires sur le bord de fuite des pales, les transmissions d'un écoulement laminaire dont le spectre se traduit par un spectre de type bosse de bruit. L'éclatement de bulles de cavitation et de bulles présentes dans le sillage produit un spectre de type bosse de bruit dont la fréquence maximale est liée à la taille de la bulle : plus la bulle est grosse, plus la fréquence correspondant au maximum de la bosse de cavitation est localisée en basses fréquences [Plesset_1977].

La source acoustique large bande prédominante d'un bateau est la cavitation liée à sa propulsion. Le phénomène de cavitation correspond à une transition de phase thermodynamique permettant de

passer de l'état liquide à l'état gazeux. Contrairement à l'ébullition qui est obtenue lors d'une variation de température à pression constante, la cavitation est induite par une dépression du fluide pour une température constante. Ainsi, lorsque la pression devient inférieure à la pression de vapeur saturante, une bulle de vapeur est formée (Figure 7). Plus la dépression est marquée, plus la bulle sera grande. Ce phénomène de dépression peut être créé lors de l'écoulement d'un fluide à forte vitesse (cavitation hydrodynamique), lorsque le fluide est soumis à une onde acoustique (cavitation acoustique) ou à une forte énergie lumineuse (cavitation optique). Pour le système de propulsion d'un bateau, ce phénomène est provoqué par l'apparition d'une dépression le long du bord de fuite de chaque pale lors la rotation des hélices (Figure 7). Il est à noter qu'un phénomène moins conséquent de cavitation apparaît aussi le long de la carène du bateau lors de sa mise en mouvement. Ce phénomène est destructif pour l'hélice et provoque une érosion des surfaces où les bulles sont créées ainsi que des arrachements métalliques (Figure 7). Lorsque les principaux paquebots tels que le *Bremen*, le *Queen Mary* et le *Normandie* se disputaient le record de vitesse de la traversée de l'Océan Atlantique dans les années 1930-1940, des arrachements métalliques allant jusqu'à 14 centimètres de profondeur ont été observés [Laures_2015]. Les dégradations modifient l'écoulement du fluide dégradant ainsi les performances du bateau et augmentant son bruit propre. L'amélioration de l'écoulement du fluide autour de l'hélice permet de limiter ce phénomène. Cette amélioration peut être réalisée en modifiant le revêtement de l'hélice, par utilisation d'un thermoplastique le Polyamide 11 par exemple, ou en privilégiant certains types de propulseurs tel que les hélices en tuyères qui limitent les survitesses en bout de pale et retardent l'apparition de la cavitation. Ce phénomène de cavitation est aussi présent dans les propulsions hydrojets. [Erbe_2013] montre que le bruit généré par les jet-skis produit une émission large bande comprise entre 100 Hz et 10 kHz en raison du nuage de bulles généré par l'eau expulsée par la propulsion jet. Les propulsions de type hydrojet restent toutefois moins bruyantes que les propulsions à hélice [Buckstaff_2004, Erbe_2010].

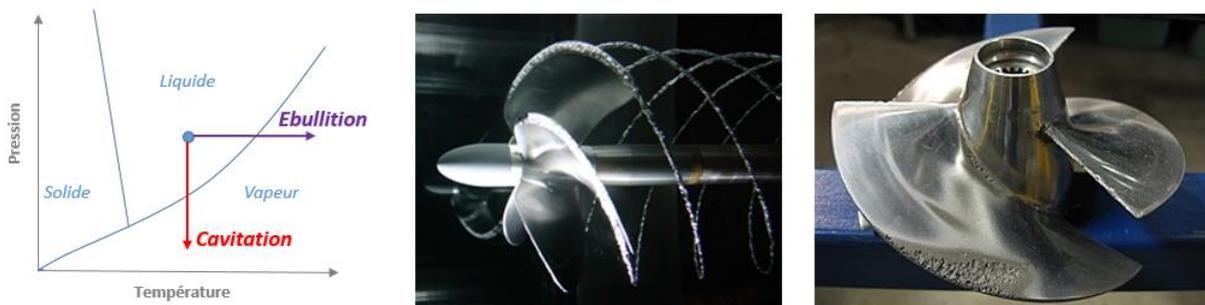


Figure 7 : La cavitation des hélices : à gauche la représentation du diagramme thermodynamique correspondant au phénomène de cavitation, au centre la visualisation du sillage de bulles créées par le phénomène de cavitation de l'hélice (Source : <https://heliciel.com/aerodynamique-hydrodynamique/cavitation-%20helices-hydrofoils.htm>) et à droite la dégradation induite par le phénomène de cavitation (Source : Wikipédia)

Les bruits large-bande et principalement le bruit de cavitation subissent des variations basse fréquence de leur enveloppe : on parle alors de phénomène de modulation. Plusieurs sources sont à l'origine de cette modulation. La source principale est la rotation des pales de l'hélice [Lourens_1988, Kudryavtsev_2003]. De plus, en fonction de la taille du navire et des conditions de mer, le roulis (oscillations selon l'axe bâbord/tribord) et le tangage (inclinaison vers l'avant et vers l'arrière) créent aussi une modulation de ce bruit de cavitation [Kudryavtsev_2003].

Plusieurs adjectifs sont utilisés dans la littérature pour définir le **bruit bande étroite** : raie spectrale, bruit tonal. Cette production bande étroite trouve son origine dans 3 sources : le système de propulsion et la motorisation (principale et secondaire pour les navires équipés d'hélice de manœuvre) ainsi que les auxiliaires présents à bord du bâtiment. Cette production sonore se manifeste

spectralement par la présence des raies caractérisées par des fréquences fondamentales et leurs harmoniques (raies dont les fréquences correspondent à un multiple entier de la fréquence fondamentale). Les fréquences de ces raies dépendent de la vitesse du bateau et du type de manœuvre effectuée [Arveson_2000]. De plus, [Arveson_2000] montre une directivité des bruit tonals. L'identification des fréquences fondamentales permet alors de retrouver des caractéristiques du bateau.

Deux types de propulsions sont principalement utilisés dans le domaine de la navigation : la propulsion à l'hélice (immergée, en tuyère, sur pods, etc.) et plus marginalement les propulsions hydrojets, présent sur les bateaux type jet-ski, sur les petites embarcations portuaires nécessitant une bonne maniabilité et les navires fonctionnant à grande vitesse (yacht rapide, ferrys grande vitesse). Le nombre de pales par hélice est compris entre 2 et 3 pour les petites embarcations, 4 et 5 pour les navires de commerce et jusqu'au 8 pour les sous-marins. En plus de la création du phénomène de cavitation, la périodicité des systèmes en rotation provoque via des phénomènes de couplage l'apparition de bruit tonal. La production sonore liée à la propulsion de type hélice se caractérise par l'apparition de deux familles de raies (Table 2).

	Shaft et Blade Rate	Chant d'hélice
Origine	Liée à la rotation d'une pale ou de l'hélice [Lourens_1988]	Couplage hydroacoustique entre le champ acoustique rayonné par le bord de fuite des pales et la vibration du bord de fuite
Caractéristique	f_{SR} : Nombre de tours par secondes effectués par une pale <i>Shaft Rate</i> f_{BR} : rotation de l'hélice : <i>Blade Rate</i> N_b : nombre de pales de l'hélice : $f_{BR} = N_b \cdot f_{SR}$	Tonale très énergétique vers les 1000 Hz [Blake_1984]
Identification	Identification par analyse DEMON (<i>Detection of Envelope Modulation On Noise</i>) [Sutin_2013a].	

Table 2 : Caractérisation de raies induites par une propulsion hélice

Pour les bateaux équipés de plusieurs hélices, de faibles différences de vitesse de rotation entre les différences hélices peuvent être observées, provoquant l'apparition de raies distinctes pour les indices d'harmoniques élevés. Dans le cas d'une propulsion de type hydrojet, l'hélice est placée dans un conduit. La littérature présente peu d'études sur le bruit induit par ce type de propulsion. [Erbe_2013] montre la présence de bruit tonal modulé en fréquence correspondant à la rotation des lames de turbine entre 100 et 800 Hz.

Plusieurs types de motorisation sont utilisés dans le domaine de la navigation : les moteurs thermiques à combustion interne (diesel, essence et turbine à gaz), les moteurs électriques et plus marginalement les moteurs thermiques à combustion externe (turbine à vapeur et anciennement chaudière). La majorité des navires sont équipés de moteur diesel. Les moteurs diesel et essence sont tous les deux des moteurs à combustion, composés de différents éléments en rotation et possèdent plusieurs cylindres fonctionnant en cycles décalés. Chaque cylindre a un cycle de combustion qui se décompose en 2 ou 4 étapes, appelés temps (Figure 8).

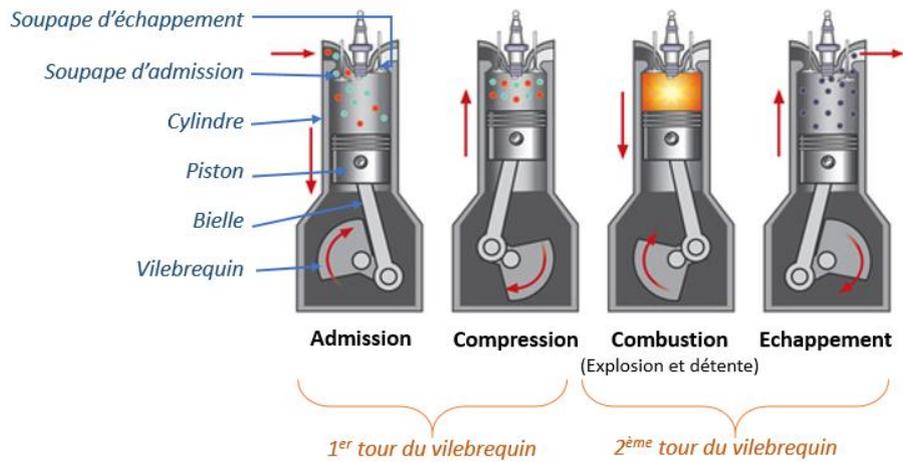


Figure 8 : Fonctionnement d'un moteur 4 temps (Source : <https://www.ornikar.com/code/cours/mecanique-vehicule/moteur>)

D'un point de vue acoustique, la rotation des éléments et les cycles de fonctionnement des moteurs provoquent l'apparition de deux ensembles de raies caractéristiques par deux fréquences fondamentales. L'identification de ces raies permettant de déterminer les caractéristiques du moteur du bateau (Table 3).

Rotation du vilebrequin	Périodicité des explosions dans le moteur
f_{CR} : le nombre de tours réalisés par le vilebrequin en 1 seconde (Crankshaft Rate)	f_{EF} : le nombre d'explosions dans le moteur par secondes (<i>Engine Firing</i>)
f_{CF} : la fréquence d'allumage du cylindre (Cylinder Firing Rate)	
Pour les moteurs 2 temps : $f_{CF} = f_{CR}$	
Pour les moteurs 4 temps : $f_{CF} = f_{CR}/2$	
N_c : le nombre de cylindre du moteur : $N_c = f_{EF}/f_{CF}$	
Λ_g : le rapport de réduction d'un bateau : $\Lambda_g = f_{CR}/f_{SR}$	
(Traduit les caractéristiques physiques de l'engrenage, élément très discriminant pour les grandes embarcations)	

Table 3 : Caractérisation de raies induites par une motorisation à piston [Ogden_2011]

Dans le cas de moteur hors-bord et de jet-skis, les surfaces de contact entre la coque et la motorisation sont très réduites, voire inexistantes : la contribution de ces sources vibroacoustiques est négligeable. Le cycle de fonctionnement des turbines à gaz (organes moteurs séparés) ou des moteurs électriques (rotation du rotor par magnétisme) diffère des moteurs à piston. Peu d'études font référence à ces deux types de motorisation dans la littérature d'acoustiques sous-marine. En revanche, les études acoustiques de moteur électrique de voiture ont montré la propagation de tonales par vibroacoustique dans un matériau [Dupont_2012]. Les moteurs à pistons sont composés de nombreux éléments à synchroniser. Une désynchronisation entre les cycles et entre les cylindres provoque alors des fluctuations dans les raies spectrales. A l'inverse, les turbines à gaz et les moteurs électriques sont composés d'éléments en rotation constante ne nécessitant pas de synchronisation. Les raies spectrales auront donc tendance à être plus stables.

Les bâtiments de commerce, de transport de passagers et militaires sont équipés de systèmes auxiliaires nécessaires au fonctionnement à bord du bateau tels que les groupes électrogènes, les systèmes de ventilation ou le système de désalinisation de l'eau pour les sous-marins. Les vibrations induites par les équipements sont alors transmises au milieu par vibration de la coque.

1.5.2 Les effets liés à la propagation des ondes acoustiques d'un bateau en mouvement

En plus du phénomène de diffraction présenté dans 1.1, le bruit rayonné par les bateaux, du fait de sa mobilité, subit deux effets de propagation : les phénomènes d'interférences et l'effet Doppler.

Lors de la propagation des ondes acoustiques, des phénomènes d'interférence entre multi composantes (différents rayons et/ou différents modes suivant la fréquence) peuvent être observés. Dans le cas de bruits rayonnés de bateau, la figure d'interférence la plus connue est le miroir de Lloyds résultant de l'interaction entre le rayon direct et le rayon réfléchi par la surface (pour les sources immergées). La différence de temps de parcours entre les deux trajets crée un déphasage à la réception par l'enregistreur acoustique. De plus, la réflexion d'une onde acoustique sur la surface de l'eau provoque un déphasage de 180° [Erbe_2010]. La différence de phase entre les deux signaux crée des interférences constructives (addition de phase) ou destructives (opposition de phase) en fonction de la fréquence étudiée et de la distance du bateau. Les figures d'interférence sont caractérisées par un pas d'interférence correspondant à la différence entre deux fréquences sujettes à un déphasage constructif. Ce pas est inversement proportionnel au retard entre les rayons. Le bateau étant une source en mouvement, la distance entre la source et le récepteur ainsi que le déphasage du signal évoluent dans le temps. Par conséquent, une évolution temporelle du pas d'interférence est observée : ce pas diminue lorsque le bateau s'approche et augmente lorsque le bateau s'éloigne. Ainsi, cette figure d'interférence se traduit sur l'affichage temps-fréquence (spectrogramme) par l'apparition de « paraboles » centrées sur un instant donné correspondant à l'instant où le bateau passe au plus proche de l'enregistreur : CPA (*Closest Point of Approach*) [Figure 9]. L'analyse du miroir de Lloyds et du pas d'interférence permet d'extraire des informations sur la distance du récepteur et son immersion [Servajean_1994] et d'estimer les paramètres du fond par inversion géo acoustique passive [Gervaise_2012a].

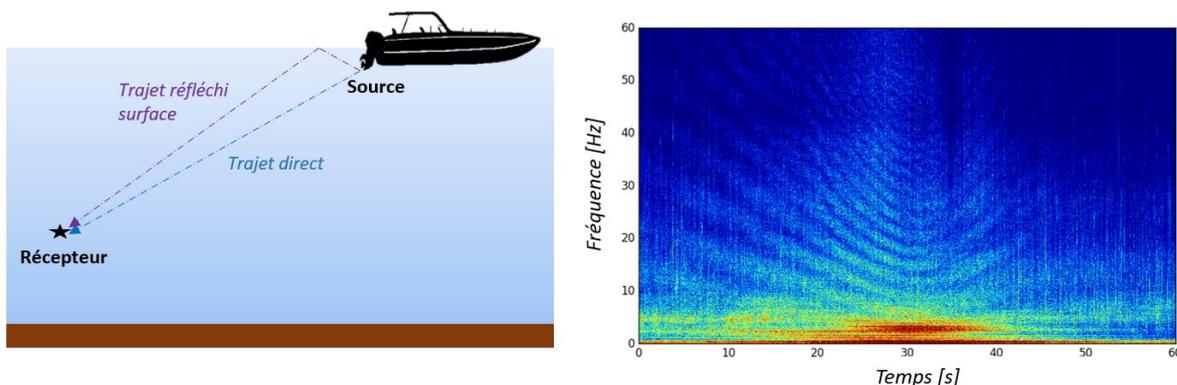


Figure 9 : Le miroir de Lloyds : explication du phénomène (à gauche) et visualisation sur spectrogramme (à droite)

Le bruit bande étroite est également affecté par un autre phénomène de propagation, l'effet Doppler. Présenté par Christian Doppler en 1842 [Doppler_1843], l'effet doppler traduit le décalage fréquentiel qu'une onde subit lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie en fonction du temps (Figure 10). Dans la vie courante, ce phénomène est parfaitement illustré par le passage d'une ambulance : lorsque l'ambulance s'approche, le son produit par sa sirène est plus aigu que lorsque l'ambulance s'éloigne. Ce décalage fréquentiel est estimé par la formule suivante :

$$f_r = f_0 \left(\frac{c+v_r}{c+v_s} \right) \quad \text{- Équation 2} \quad \text{- Avec :}$$

- f_0 : la fréquence d'origine exprimée en Hz,
- c : la vitesse de propagation du son dans l'eau exprimée en m/s,
- v_r : la vitesse du récepteur exprimée en m/s,
- v_s : la vitesse de la source exprimée en m/s.

Par convention les vitesses v_r et v_s sont exprimées positivement lorsque la source ou le récepteur s'approchent et négativement lorsqu'ils s'éloignent. Dans le cas de l'étude de bruits rayonnés de navires par acoustique passive, le terme v_r lié à la source est nul. Lorsque le bateau s'approche, la fréquence des raies spectrales observées est plus importante que la fréquence réellement émise par le bateau et inversement lorsque le bateau s'éloigne (Figure 10). Le décalage fréquentiel est directement lié à la vitesse du bateau et la fréquence d'origine : plus un bateau ira vite ou plus la fréquence d'origine sera élevée, plus ce décalage sera marqué. L'analyse et la correction du Doppler sont des éléments clés pour les analyses acoustiques [Josso_2009]. L'étude de la figure de Doppler permet de renseigner sur la vitesse du bateau. L'identification des caractéristiques mécaniques du bateau par analyse des raies spectrales doit être réalisée après correction du Doppler.

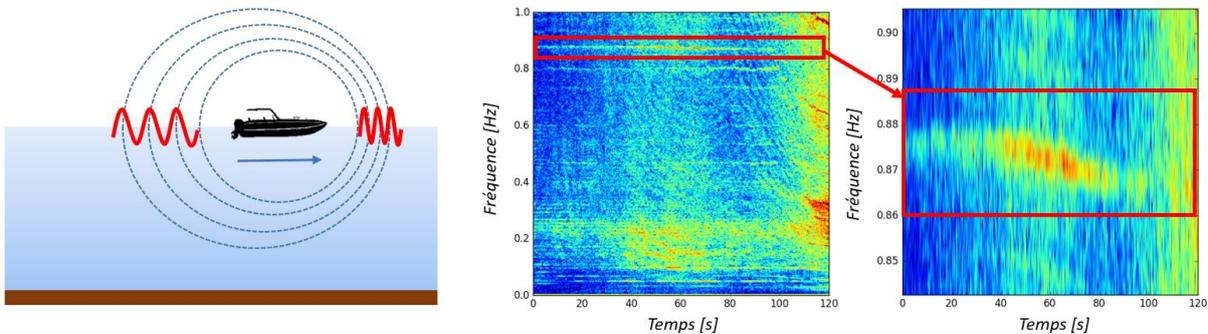


Figure 10 : L'effet Doppler, explication du phénomène de propagation (à gauche) et visualisation sur spectrogramme de l'effet Doppler d'un bateau allant à 16.6 nœuds sur une raie à 872 Hz (au centre et à droite)

1.5.3 Les modèles de bruits rayonnés par les bateaux

Différents modèles paramétriques permettant d'identifier le spectre du signal source rayonné à 1 mètre sont présents dans la littérature. En ce qui concerne la modélisation bande étroite, [Gray_1980] propose une caractérisation des bruits induits par la propulsion des bateaux de commerce. Ce modèle est confirmé lors des analyses de bruits tonals rayonnés par [Wright_1983, Aveson_2000]. Les études de modélisation portent essentiellement sur le bruit large bande rayonné. Deux modèles historiques sont les plus fréquemment cités : le modèle de ROSS et le modèle de RANDI 3.1. Le premier modèle paramétrique a été proposé par Ross en 1976. Il se base sur une analyse du bruit de cavitation en fonction de la fréquence, à laquelle est ajouté un terme indépendant de la fréquence, relatif aux différents paramètres du bateau. A partir de 100 Hz, l'analyse du bruit moyen de cavitation d'hélice montre une décroissance logarithmique en fonction de la fréquence : $S_{cav}(f) = 20 - 20 \log_{10}(f)$ (Équation 3). Ross propose alors 4 expressions paramétriques permettant de relier le spectre de cavitation d'hélice au spectre de bruit rayonné par un bateau en fonction de la vitesse, du tonnage du bateau, de la vitesse de pointe de l'hélice et le nombre de pales de l'hélice. Différents modèles et études tels qu'Ulrick [Ulrick_1983], [Wright_1983], ANTARA [Espérandieu_1990] et [Scrimger_1991] confirment cette décroissance en $20 \cdot \log_{10}(f)$ et proposent des adaptations du terme liant le spectre « bosse de bruit » aux paramètres physiques du bateau. Le modèle de RANDI « *Research Ambient Noise Directionality* » présente une adaptation du modèle de ROSS et permet une prédiction les niveaux acoustiques rayonnés par un bateau ainsi que leur directivité. Ce modèle est composé de trois

termes : la base spectrale, le terme d'ajustement en fonction des caractéristiques du bateau et un terme correctif en basse fréquence (inférieure à 200 Hz). Une différence notable est présente dans la caractérisation du terme spectral, qui propose une décroissance au $18 \cdot \log_{10}(f)$ au-dessus de 500 Hz. Une association de ces deux modèles, ROSS et RANDI 3.1 est réalisé par [Hamson_1997] conserve la décroissance en fonction de la fréquence du modèle de Ross et utilise le terme d'ajustement en fonction des paramètres du bateau de RANDI 3.1.

Plus récemment, de nouveaux modèles de bruits rayonnés sont apparus. En 2002, suite aux changements mécaniques depuis la 2ème guerre mondiale, les modèles de ROSS et de RANDI sont remis en question par Wales et Heitmeyer, qui propose alors un nouveau modèle dépend uniquement de la fréquence. Des adaptations du modèle de Wales sont réalisées par [Brooker_2015] pour permettre de prendre en considération la catégorie et la vitesse du bateau. [Wittekind_2014] propose alors un modèle plus complexe liant la forme du spectre aux caractéristiques du bateau. Il est composé de trois termes caractérisant une cavitation basse fréquence SL_1 , une cavitation haute fréquence SL_2 , et le bruit dû à la motorisation diesel SL_3 . [Audoly_2015] caractérise le bruit rayonné en fonction de l'origine de la source : la motorisation, la propulsion et la cavitation. Pour les trois sources, un spectre de bruit dépendant de la fréquence et de la vitesse du bateau est défini. Le bruit global rayonné du bateau est alors la résultante des trois catégories, auxquelles s'ajoute un terme permettant de prendre en compte la longueur du bateau et un terme correctif pour les basses fréquences. [Simard_2016a] montre une variabilité très élevée (20 à 40 dB) des niveaux sonores pour quatre catégories de bateaux de plus de 50 m de longueur et la non adéquation de modèle classique de RANDI et Wales. Plusieurs modèles de spectre de bruit sont présentés dont $LBDS AS^4$. Ce modèle polynomial du cinquième ordre est estimé par la méthode des moindres carrés retenu pour prédire les niveaux source à partir de la fréquence et de quatre caractéristiques de navire : longueur, largeur, tirant d'eau et vitesse du navire. Ce modèle exprime 77 % de la variance des observations.

La Table 2 (voir page suivante) présente les différents modèles de bruits rayonnés par les bateaux : les deux modèles historiques, ROSS et RANDI 3.1 et les 5 derniers modèles présents dans la littérature.

Les modèles présentés ont été réalisés à partir d'analyse de bases de données composées de grands bateaux de commerce et militaires [Dow_1945], et d'autres sur les navires de pêche [Breeding_1996]. D'autres études présentent des analyses de spectre moyen de grandes embarcations [Aveson_2000, Gervaise_2012b, Simard_2016a] et de types particuliers de bateaux tels que les bateaux de type brise-glace [Erbe_2000]. Peu d'études sont consacrées au bruit rayonné par les petites embarcations de type zodiac [Erbe_2008, Matzner_2010, Lennartsson_2000, Gervaise_2012b], jet ski [Erbe_2013], etc.

Remis en cause par de nombreuses études, les modèles historiques, ROSS et RANDI, ne semblent plus appropriés à la modélisation des bruits rayonnés par les embarcations modernes. L'analyse bibliographique concernant la modélisation du bruit rayonné par de grandes embarcations permet d'appréhender l'allure générale du bruit large bande. Le facteur dominant est la fréquence : les spectres sont composés d'une bosse de bruit dont la fréquence maximale et le coefficient de décroissance logarithmique semblent dépendre de la base de données. Les caractéristiques physiques (en termes de taille, tonnage et / ou catégorie) ainsi que les paramètres contextuels (vitesse) du bateau influent sur le bruit rayonné : plus l'embarcation est grande ou rapide, plus les niveaux sonores émis sont importants. Parallèlement, cette étude permet de constater le peu de connaissance en ce qui concerne les modèles pour les petits navires (ou la modélisation des bruits « bande étroite »). Il est donc possible de supposer que les bruits « large bande », émis par les petites embarcations, soient aussi influencés par les mêmes facteurs, et sont ainsi modélisables par un spectre ayant une forte dépendance en fonction de la fréquence et pondéré par un facteur lié à la taille et à la vitesse du bateau.

Nom et Réf	Paramètres	Formule
Ross [Ross_1976]	Fréquence f [Hz] Vitesse du bateau V [knots], Tonnage [tons], Nombre de pale B, Vitesse de l'hélice U [m/s]	$S_{ROSS_1}(f) = 20 - 20 \cdot \log_{10}(f) + L_{ROSS_1}(V, D_T)$ $S_{ROSS_2}(f) = 20 - 20 \cdot \log_{10}(f) + L_{ROSS_2}(U, B)$ <p><u>Avec :</u></p> $L_{ROSS_1}(V, D_T) = 134 + 60 \cdot \log_{10}\left(\frac{V}{V_{ref}}\right) + 9 \cdot \log_{10}(D_T) \quad \text{Avec : } V_{ref} = 10 \text{ knots}$ $L_{ROSS_2}(U, B) = 175 + 60 \cdot \log_{10}\left(\frac{U}{U_{ref}}\right) + 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{B}{4}\right) \quad \text{Avec : } U_{ref} = 25 \text{ m/s}$
RANDI 3.1 [Breeding_1996] Et RANDI [Wagstaff_1973]	Fréquence f [Hz] Vitesse du bateau V [knots] Longueur du bateau Le [feet]	$S_{RANDI3.1}(f, V, Le) = S_{RANDI_{spectre}}(f) + S_{RANDI_{adj}}(V, Le) + S_{RANDI_{bf}}(f, Le)$ <p><u>Avec :</u> $V_{ref} = 12 \text{ knots}$ et $Le_{ref} = 300 \text{ feet}$</p> $S_{RANDI_{spectre}}(f) = \begin{cases} -10 \cdot \log_{10}(10^{(-14.34 - 1.06 \cdot \log_{10}(f))} + 10^{(-21.425 - 3.32 \cdot \log_{10}(f))}) & \text{si } f < 500 \text{ Hz} \\ 173.20 - 18 \cdot \log_{10}(f) & \text{si } f > 500 \text{ Hz} \end{cases}$ $S_{RANDI_{adj}}(V, Le) = 60 \cdot \log_{10}\left(\frac{V}{V_{ref}}\right) + 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{Le}{Le_{ref}}\right) + 3$ $S_{RANDI_{bf}}(f, Le) = \gamma(f) \frac{Le^{1.15}}{3643} \quad \gamma(f) = \begin{cases} 8.1 & \text{si } f < 28.4 \text{ Hz} \\ 22.3 - 9.77 \cdot \log_{10}(f) & \text{si } 28.4 \text{ Hz} < f < 191.6 \text{ Hz} \\ 0 & \text{si } f > 191.6 \text{ Hz} \end{cases}$
Wales-Heitmeyer [Wales_2002]	Fréquence f [Hz]	$S_{WH}(f) = 230 - 10 \log_{10}(f^{3.594}) + 10 \log_{10}\left(\left(1 + \frac{f^2}{340^2}\right)^{0.917}\right)$
Wittekind [Wittekind_2014]	Fréquence f [Hz] Vitesse du bateau V [knots], La vitesse de création de cavitation V_c , [knots] Le coefficient de blocage de la coque C_B , le tonnage D_T [tons], La masse du moteur m [tons] Le nombre de moteurs n	$S_{Wittekind} = SL_1(f, D_T, C_B, V, V_c) + SL_2(f, D_T, C_B, V, V_c) + SL_3(f, m, n, E)$ <p><u>Avec :</u></p> $SL_1(f, D_T, C_B, V, V_c) = 125 + 0.35 \cdot f - 8.10^{-3} \cdot f^2 + 6.10^{-5} \cdot f^3 - 2.10^{-7} \cdot f^4 + 2.2 \cdot 10^{-10} \cdot f^5 + \frac{20}{3} \log_{10}\left(\frac{D_T}{D_{T,ref}}\right) + 80 \cdot \log_{10}\left(\frac{4C_B \cdot V}{V_c}\right)$ $SL_2(f, D_T, C_B, V, V_c) = -\ln(f) - \frac{1000}{f} + 10 + \frac{20}{3} \log_{10}\left(\frac{D_T}{D_{T,ref}}\right) + 60 \cdot \log_{10}\left(\frac{100 \cdot C_B \cdot V}{V_c}\right)$ $SL_3(f, m, n, E) = 10^{-1} \cdot f^2 - 0.01 \cdot f + 140 + 15 \cdot \log_{10}(m) + 10 \cdot \log_{10}(n) + E$ <p>Avec $D_{T,ref} = 10\,000 \text{ tonnes}$ et $E : 0$ si le moteur est monté de manière élastique, 15 sinon</p>
SONIC [Brooker_2015]	Fréquence f [Hz] Vitesse du bateau V	$S_{SONIC}(f, V) = S_{WH}(f) + 60 \log_{10}\left(\frac{V}{V_{ref}}\right)$ <p><u>Avec</u> V_{ref} : dépend de la classe de bateau (et de la longueur)</p>
AQUO [Audoly_2015]	Fréquence f [Hz] Vitesse du bateau V [knots] Longueur du bateau Le [feet]	$S_{AQUO}(f, V, Le) = 10 \cdot \log_{10}\left(\sum_{source}^{mot, pro, cav} 10^{\frac{SL_{source}(f, V)}{10}}\right) + 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{Le}{Le_{ref}}\right) + SL_{cor}(f, V, Le)$ <p><u>Avec :</u></p> $SL_{source}(f, V) = \begin{cases} K_1 + K_2 \cdot \log_{10}(V) + K_5 \cdot \log_{10}(f) & \text{si } f < f_{source} \\ K_4 + K_5 \cdot \log_{10}(V) + K_6 \cdot \log_{10}(f) & \text{si } f > f_{source} \end{cases}$ <p>Pour les sources : motorisation, propulsion et cavitation</p>
LBDS AS ⁴ [Simard_2016]	Fréquence f [Hz] Longueur Le [m] Largeur b [m] Tirant d'eau d [m] Vitesse V [knots]	$S_{LBDS AS^4}(f, Le, b, d, V) = 285.4 + SL_1(f) + SL_2(Le, b, d) + SL_3(V)$ <p><u>Avec :</u></p> $SL_1(f) = 0.0496f - 4.8 \cdot 10^{-7}(f - 2103.26)^2 - 6.933 \log_{10}(f) - 4.93(\log_{10}(f) - 27.0016)^2 - 0.058(\log_{10}(f) - 27.0016)^3 - 0.004(\log_{10}(f) - 27.0016)^4 - 7.6 \cdot 10^{-7}(\log_{10}(f) - 27.0016)^5$ $SL_2(Le, b, d) = 13.47 \log_{10}(Le) - 0.55b + 0.0008(b - 26.8854)^2 + 0.706d$ $SL_3(V) = 20.164 \cdot \log_{10}(V) - 505.1(\log_{10}(V) - 1.12024)^3 - 289.9(\log_{10}(V) - 1.12024)^5$

Table 4 : Principaux modèles paramétriques de spectre de bruit rayonnés par les navires

1.5.4 La standardisation de mesure de bruits rayonnés

Un protocole de mesure de bruits rayonnés par les embarcations est spécifié par la réglementation ANSI-ASA S12.64 [American National Standard_2009] et par la norme ISO 17208-1 [International Standardization Organization_2012, International Standardization Organization_2016]. Il prend en considération la directivité du bruit rayonné, les différences observées lors des manœuvres et les effets de sa propagation. La Figure 11 synthétise l'ensemble des conditions spécifiées par les normes. Des groupes de travaux tels que le GW1 du comité ISO TC 43/SC3 s'intéressent à la mesure en petit fond : aucune norme n'est spécifiée à ce jour.

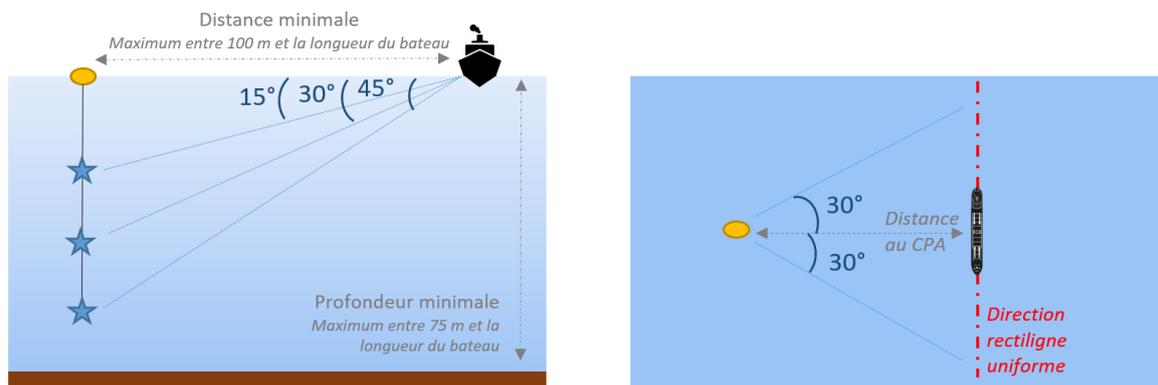


Figure 11 : Standardisation sur la mesure de bruits rayonnés des bateaux par la norme ANSI -ASA S12.64

1.5.5 Impact du bruit rayonné par les bateaux sur la vie aquatique

Le bruit rayonné par les bateaux provoque différents effets chez les mammifères marins tels que le masquage acoustique et réduction des espaces de communication [Simard_2008]. Des modifications des vocalises sont à noter : diminution du taux de vocalise et augmentation de la fréquence fondamentale chez les mysticètes [Parks_2007], augmentation du taux de vocalise chez les dauphins [Buckstaff_2004] augmentation de la durée des vocalises chez les orques [Foote_2004]. Des réactions d'évitement, des changements de direction, des modifications du rythme respiratoire [Kastelein_2006] et des réductions de durée de nourrissage [Aguilar_Soto_2006] sont aussi observés. Ces phénomènes de masquages, d'évitements et de changements de direction de nage sont aussi marqués chez les poissons. [Sara_2007] observe alors une augmentation des mouvements verticaux. En ce qui concerne les invertébrés, [Lagardère_2002] montre l'augmentation du bruit ambiant de 60 dB à 130 dB dans la bande 5 -1000 Hz provoque une diminution de la croissance, de la fréquence de nourrissage et de reproduction ainsi qu'une augmentation du cannibalisme de la crevette grise *Crangon crangon*. Des phénomènes d'accoutumance ont été observés chez les dauphins [Sini_2005] ou chez les poissons [Schwarz_1984].

Différentes métriques permettent d'estimer les niveaux entendus par les mammifères marins et les poissons. [Southall_2007] propose une caractérisation de l'audition des cétacés et pinnipèdes par une fonction de pondération appelée M-weighting. Les niveaux SEL et SPL pics sont alors estimés et comparés à trois seuils caractérisant les pertes temporaires ou permanentes de l'audition et un changement comportemental. La valeur de ces seuils dépend alors du type de source et du type de mammifère marin. De manière similaire, [Nedwell_2007] propose une méthode de caractérisation des sons entendus par les poissons en comparant les spectres reçus à l'audiogramme des poissons. L'impact est caractérisé par 4 seuils : 50 dBht correspondant à une réaction comportementale, 90 dBht correspondant au seuil d'endommagement, 110 dBht correspondant à la limite de tolérance du bruit et 130 dBht correspondant à d'éventuels dommages auditifs traumatiques. Cette méthode est remise en question par [Popper_2014] qui souligne le fait qu'un certain nombre de poissons sont sensibles à

la vitesse particulière et non uniquement aux variations de pression acoustique et remet en question les audiogrammes obtenus en utilisant la méthode *Audiotory Evoked Potential*.

La gamme de fréquence d'audition des poissons étant superposée à la gamme de fréquence d'émission des bruits rayonnés par les bateaux, l'influence de cette source sonore sur la population ichtyologique ne peut être ignorée. D'ailleurs, les poissons sont d'avantage concernés par le bruit des bateaux que les mammifères-marins moyennes et hautes fréquences telles que le grand Dauphin. En l'absence de méthode « officielle » dédiées à l'étude d'impact sonore sur les poissons, généralisables pour l'ensemble des espèces et validées par l'ensemble de la communauté, les niveaux dBht sont utilisés dans de nombreuses publications.

1.6 Conclusion

La propagation des ondes acoustiques est le meilleur moyen de transmission sous l'eau. Cette propagation est une science complexe dépendant du milieu d'étude (en termes de paramètres physicochimiques et de hauteur d'eau), soumise à différents phénomènes tels que la réfraction (provoquant des zones d'ombre et des zones de convergence) et aux phénomènes d'interférence. Discret, non intrusif, non sélectif, autonome et permettant une écoute sur une longue durée, le monitoring par acoustique sous-marine permet d'étudier un environnement sous différents aspects tels que le renseignement pour la défense, l'étude des populations de mammifères marins, la surveillance de chantiers, etc.

Les sons présents dans un milieu forment le paysage acoustique caractérisé par 3 catégories de sources : la géophonie (bruits météorologiques et sismiques), la biophonie (bruits produits par les mammifères marins, les poissons et la population benthique) et l'anthropophonie (bruits produits par l'homme. Le bruit rayonné par le trafic maritime constitue la source principale de l'anthropophonie.

Le bruit rayonné par les bateaux provient des sources hydrodynamiques (l'interaction du fluide sur des parties du bateau telles que les pales d'hélice et la carène), et des sources vibroacoustiques (la présence de sources excitatrices produisant des vibrations sur la carène du bateau). Ce bruit directif est composé de bruit large bande, principalement dû au phénomène de cavitation, et de bruit bande étroite, induit par le système de propulsion, la motorisation et des différents auxiliaires présents dans le bateau. L'identification des raies permet alors de retrouver les caractéristiques techniques du bateau. Le bruit rayonné par les bateaux n'échappe pas à ces phénomènes de propagation et est particulièrement sujet à l'effet Doppler et aux phénomènes d'interférence matérialisés par la présence de miroirs de Lloyds. Différents modèles de bruits rayonnés permettent de caractériser celui des grandes embarcations. La mesure du bruit rayonné est réglementée par la norme ANSI-ASA S12.64 et ISO 17208-1.

L'étude par acoustique passive des bruits rayonnés par les bateaux, à l'échelle individuelle et du trafic maritime, est réalisée dans différents domaines allant de la biologie marine aux applications militaires. Elle est réalisée à travers divers thématiques tels que la localisation, la détection et la classification automatique, la modélisation du trafic maritime, l'étude de l'influence sur la vie aquatique et l'intégration dans le paysage acoustique.

Les travaux présentés dans cette thèse répondront à un ensemble de questionnement concernant le trafic côtier, aussi bien sur le plan collectif (chapitres 4 à 5) que le plan individuel (chapitre 6 à 8). Les thématiques abordées sont : la caractérisation et la modélisation du bruit induit par le trafic maritime (Chapitre 4), l'évaluation de la contribution du trafic dans le paysage acoustique (Chapitre 5), la caractérisation individuelle de bruits rayonnés (Chapitre 6, 7) ainsi que la détection et la classification automatique (Chapitre 8).

2 Chapitre 2 : Présentation du site atelier et des bases de données

Sommaire

2.1	Introduction.....	32
2.2	Présentation du site	32
2.2.1	La zone d'étude, l'ouest de la baie de Calvi	34
2.2.2	Un écosystème riche et protégé	34
2.2.3	STARESO, une station scientifique située au cœur de la baie de Calvi	36
2.2.4	Une baie privilégiée par une flottille d'embarcations côtières estivales	36
2.3	Présentation des bases de données.....	37
2.3.1	Une base de données acoustique permettant un suivi spatio-temporel.....	37
2.3.2	Un suivi météorologique quotidien.....	38
2.3.3	L'identification du trafic maritime par l'acquisition des données AIS.....	38
2.3.4	La caractérisation du trafic maritime par la mise en place d'un protocole photographique spécifique	39
2.4	Conclusion	41

2.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif de présenter le site atelier et la base de données spécifiquement mise en place pour les travaux présentés dans ce manuscrit.

La première section de ce chapitre présente le site étudié dans ces travaux : la baie de Calvi. Ce site a été spécifiquement choisi comme site atelier pour la thèse pour deux raisons. La raison principale est contextuelle : ce site d'une grande richesse écologique, est soumis durant la saison estivale à une présence très marquée d'une flottille d'embarcations récréatives. La presqu'île de la Revellata est un site *Zone naturelle d'Intérêt Ecologique, Faunistique et Floristique* classé et protégé par le programme Natura 2000. La deuxième raison est logistique ; la présence in situ de la station scientifique STARESO, site atelier pour l'acoustique de l'Institut de Recherche CHORUS depuis 2004, facilite la mise en œuvre et la réalisation des expériences.

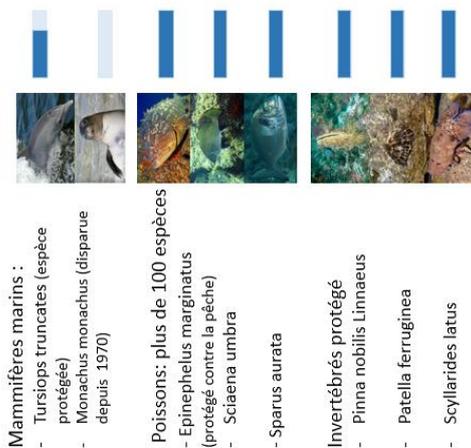
La deuxième section de ce chapitre présente la base de données recueillie pour ces travaux. D'un point de vue acoustique, cette base de données est constituée de 685 heures d'enregistrement permettant une étude spatio-temporelle des niveaux. Certaines données ont été fournies par l'Institut de Recherche CHORUS (2/3 des données acoustiques utilisées pour la thèse) et d'autres données ont été recueillies lors d'une campagne de mesure complémentaire, réalisée spécifiquement pour cette thèse. Cette base de données acoustique est complétée par des informations météorologiques et des informations sur le trafic maritime. Les informations liées au trafic maritime ont été acquises lors d'une campagne d'observation de la baie, spécifique à ces travaux, que j'ai organisée et réalisée. J'ai ainsi pu faire le suivi photographique de la baie et l'identification photographique de chaque bateau la traversant. Les informations acoustiques et photographiques brutes sont enregistrées dans deux bases de données.

2.2 Présentation du site

L'ensemble des données présentées dans ce manuscrit ont été recueillies dans la baie de Calvi, à l'ouest de la Citadelle. Cet espace abrite un écosystème riche, étudié et surveillé par les chercheurs en écologie marine de la Station de Recherche Océanographiques et sous-marines STARESO. Durant la saison estivale, cette baie devient une place privilégiée pour les activités de loisir et de plaisance. Le nombre de bateaux présents dans la baie augmente considérablement. Ces différentes conditions, la grande richesse environnementale et la facilité de mise en œuvre de manipulations terrains grâce la présence de la station STARESO ont fait de cette baie le site atelier de l'institut de recherche CHORUS. De plus, la présence très marquée durant l'été de la flottille d'embarcations côtières a permis l'obtention des données alimentant l'ensemble des travaux présentés dans ce manuscrit. La Figure 12 traduit les différents enjeux liés à cette baie.

Biodiversité

Fréquence de présence :



Activité anthropique

Mois 2015 : 550 traversées de bateaux de la baie par jour

Fréquence de traversées :

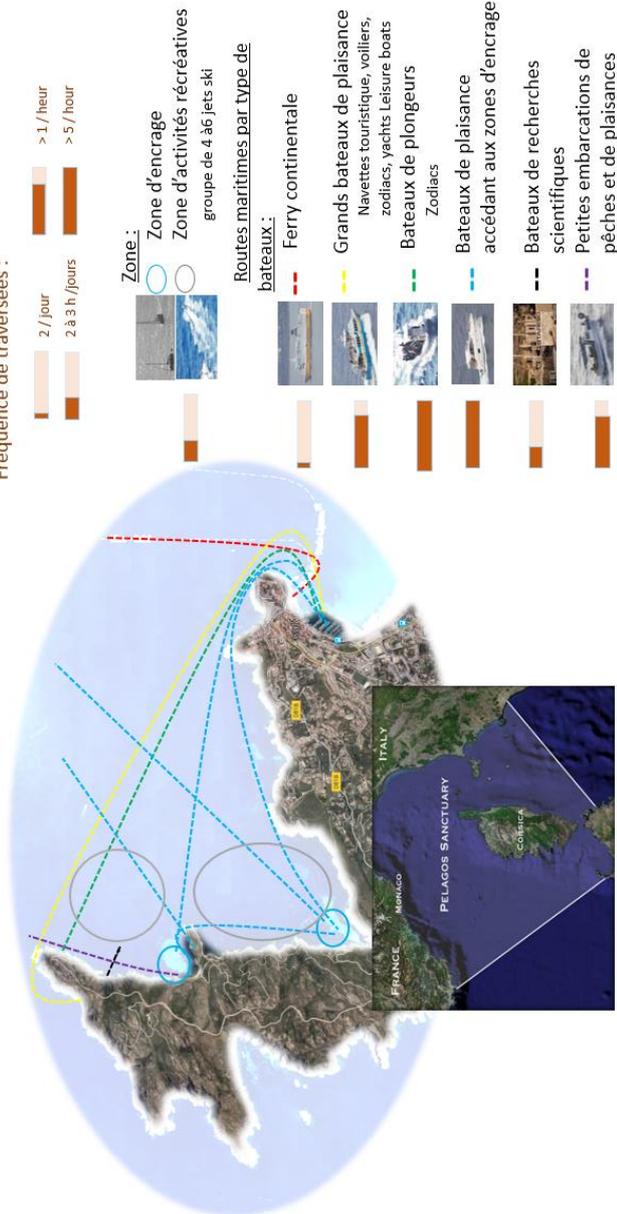


Figure 12 : La baie de Calvi est un espace protégé habitant une grande richesse écologique, soumise à une forte pression anthropique durant la saison estivale. Cette carte est extraite et traduite de [Magnier_2016b]

2.2.1 La zone d'étude, l'ouest de la baie de Calvi

La baie de Calvi, située en Corse, France ($42^{\circ}34'31.4''\text{N}$ $8^{\circ}44'16.3''\text{E}$), fait partie du sanctuaire Pelagos, un espace protégé de 87500 km² situé dans la mer Méditerranée allant de la péninsule de Giens, en France, à Fosso Chiarone, en Italie, et jusqu'à la côte Nord de la Sardaigne et englobant donc l'ensemble de la Corse (Figure 13).

La zone choisie pour cette étude correspond plus particulièrement à la baie présente à l'ouest de la Citadelle de Calvi. Cette zone, présentée sur la Figure 13, est délimitée à l'est par la Citadelle, puis à 3km à l'ouest, par la presqu'île de la Revellata et s'ouvre au nord-nord/est sur la baie de Calvi et la méditerranée. Cette zone comprend au Sud le golf de la Revellata situé à proximité de la plage l'Alga. A l'ouest, la pointe de l'Oscelluccia, située à 1km de l'extrémité de la pointe de la Revellata, sépare le golfe de la Revellata de l'anse de l'Oscelluccia. Le port principal de Calvi étant présent à l'est de la Citadelle, aucun port n'est présent dans la zone d'étude. Toutefois, quelques emplacements de mouillages permanents sont présents dans le golf de la Revellata et dans l'anse de l'Oscelluccia. Les trois points, l'extrémité de la pointe de la Revellata, la plage de l'Alga et la pointe San Francesco (pointe de direction Nord-Ouest à proximité de la citadelle) forment un triangle quasi-équilatéral dont la longueur de chaque côté est comprise entre 2,48 et 2,6 km. La partie fermée de cette zone représente approximativement 3,32 km² et a une profondeur inférieure à 50 m.

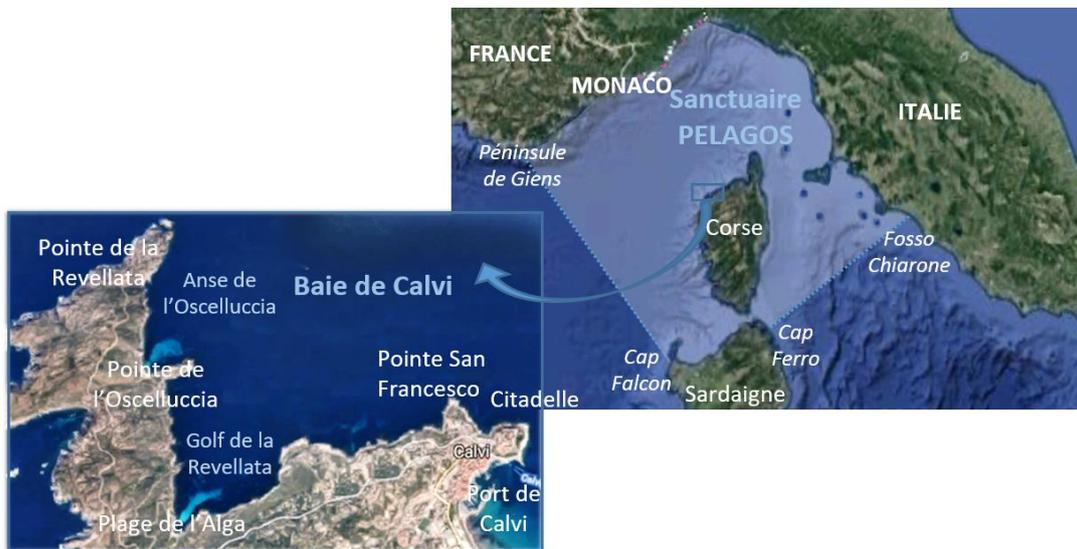


Figure 13 : La baie de Calvi est située en Corse et fait partie du sanctuaire Pelagos

2.2.2 Un écosystème riche et protégé

Protégeant les mammifères marins présents dans le sanctuaire Pelagos, l'accord Pelagos¹, signé par la France, l'Italie et Monaco, entré en vigueur le 21 Février 2002, vise à « garantir un état de conservation favorable des mammifères marins en les protégeant, ainsi que leur habitat, des impacts négatifs directs ou indirects des activités humaines ». Ce sanctuaire a été désigné comme Aire Spécialement Protégée d'Importance Méditerranéenne, dans le cadre de la Convention de Barcelone (Convention pour la protection du milieu marin et littoral de la Méditerranée). Plusieurs programmes scientifiques participent à la surveillance de ce sanctuaire. [Arcangeli_2014] récence les espèces de mammifères marins sur les différentes routes maritimes présentes dans ce sanctuaire et montre la présence fréquente sur la route Nice-Calvi du dauphin bleu et blanc, *Stenella coeruleoalba*, le rorqual commun, *Balaenoptera physalus*, le grand dauphin, *Tursiops truncatus* et le cachalot, *Physeter macrocephalu*, avec la présence occasionnelle du dauphin de Risso, *Rampus griseus*, du dauphin à bec court, *Delphinus*

¹ <http://sanctuaire-pelagos.org/fr/accord-pelagos>

delphis, le globicéphale commun, *Globicephala melas* et la baleine de Cuvier, *Ziphius cavirostris*. De plus, il est à noter que certaines espèces sont en plus protégées par des programmes individuels. C'est le cas du *Tursiops truncatus*, protégé par le programme LINDA² (*Limitation des Interactions Négatives entre les Dauphins et les Activités humaines*).

La baie de Calvi abrite une grande biodiversité en termes de poissons, elle abrite en effet plus de 100 espèces différentes. Plusieurs espèces, telles que le mérou brun *Epinephelus marginatus* et le corb *Sciaena umbra*, sont spécifiquement protégées contre les activités de pêche [Pelaprat_2000]. De manière plus générale, le programme européen de protection des sites naturels Natura 2000³ assure la protection des espèces présentes dans la baie. Différentes espèces d'invertébrés sont principalement visées par ce programme : la grande nacre, *Pinna nobilis Linnaeus*, l'Arapède géante *Patella ferruginea* et la grande cigale de mer *Scyllarides latus*. [Bussers_1976] a publié une liste de d'invertébrés et de poissons présents dans la baie de Calvi et dont les populations sont l'objet d'une surveillance. D'une manière plus large, le programme Natura 2000 veille aussi à la protection des habitats naturels tels que les herbiers de Posidonie *Posidonia oceanica*. En plus de son rôle d'habitat (il est le lieu de frayère et de nurserie de nombreuses espèces ainsi qu'une source de nourriture des espèces herbivores), cette plante océanique joue un rôle majeur dans le stockage du carbone atmosphérique et l'oxygénation du milieu. La Posidonie est donc particulièrement surveillée. Dans la baie de Calvi, [Abadie_2012] a étudié l'impact de l'ancrage sur évolution de cet herbier.

Quatre types d'habitats naturels principaux sont présents dans la baie de Calvi : le sable, l'herbier de posidonie, le coralligène et la roche (Figure 14). D'un point de vue distribution des espèces, les poissons sont principalement présents dans l'herbier de posidonie et l'activité benthique se retrouve sur la côte et les zones rocheuses [Lossent_2017].

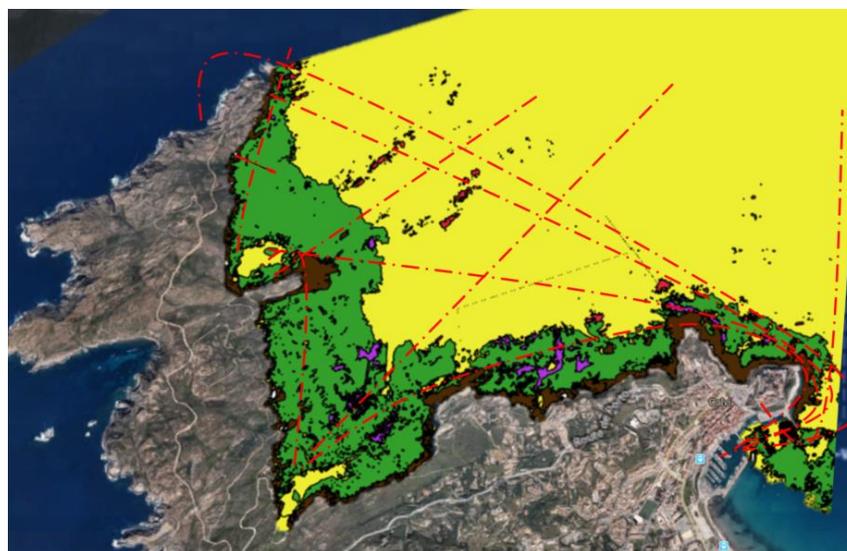


Figure 14 : Carte des habitats de la baie de Calvi avec en rouge le coralligène, en jaune le sable, en vert l'herbier de posidonie et la cymodocée (plante aquatique), en marron la roche et les galets, en violet, les zones correspondant à la matte morte (source Lamb93) et en trait pointillé rouge, le trafic maritime.

² <http://www.sanctuaire-pelagos.org/fr/activites-humaines/programme-life-linda>

³ <https://inpn.mnhn.fr/site/natura2000/FR9400574>

2.2.3 STARESO, une station scientifique située au cœur de la baie de Calvi

Durant l'ensemble de l'année, la baie de Calvi est étudiée et surveillée par les chercheurs en écologie marine de STARESO. Situé entre la pointe de la Revellata et la pointe de l'Oscelluccia, cet ancien laboratoire de l'université de Liège, devenu un organisme scientifique indépendant, œuvre sur différents sujets de recherche tels que le suivi scientifique des ressources de la pêche, la recherche de bio-indicateurs de la qualité du milieu marin littoral et l'étude des grands habitats sous-marins [Sirjacobs_2017, Lefèbvre_2017, Donnay_2016, Lossent_2017]. Depuis 2002, le projet de recherche STARE-CAPMED (*STAtion of Reference and rEsearch on Change of local and global Anthropogenic Pressures on Mediterranean Ecosystems Drifts*) a pour objectif d'établir un site référence à long terme permettant de comprendre l'évolution des écosystèmes méditerranéens côtiers et océaniques, soumis aux pressions des activités humaines locales et globales (changement climatique). L'observation par acoustique passive de la biodiversité et des forçages anthropiques est assurée par l'Institut de Recherche CHORUS.

Cette base scientifique accueille régulièrement des étudiants, chercheurs, et met à disposition des plongeurs habilités pour l'installation de matériels scientifiques avec les moyens logistiques (embarcations légères et matériel de plongée). Les manipulations terrain que j'ai réalisées au sein de ce site atelier ont été effectuées avec le soutien de STARESO.

2.2.4 Une baie privilégiée par une flottille d'embarcations côtières estivales

Durant l'été, la baie de Calvi devient une zone très utilisée pour les activités nautiques récréatives et les activités de plaisance. Le nombre de bateaux présents dans la baie augmente considérablement : plus de 500 bateaux traversent alors cette partie de la baie chaque jour. Cette flottille saisonnière est composée d'embarcations côtières de loisir et de tourisme allant des jet-skis, aux yachts en passant par les zodiacs et les voiliers navigant au moteur [Abadie_2012, Couture_2013, Magnier_2016a].

La surveillance visuelle de la baie à montrer que le trafic maritime est localisé sur quatre zones principales : la pointe de la Citadelle, la pointe de la Revellata, l'anse de l'Oscelluccia et la plage d'Alga [Halpern_2008, Magnier_2016b]. La pointe de la Citadelle est un lieu de passage obligé pour les différentes embarcations quittant le port de Calvi et souhaitant se rendre à l'ouest de la Citadelle. Les navettes touristiques passent par la pointe de la Revellata pour aller dans le golfe de Porto et dans la réserve de Scandola, et les bateaux pour aller de l'autre côté de la presque île. Une piscine naturelle dans la roche, ainsi qu'un canyon fréquenté par les espèces emblématiques de la baie, ont fait de cet emplacement un lieu très apprécié, en particulier pour les activités de plongée. La plage de l'Alga et l'anse de l'Oscelluccia sont des emplacements appréciés pour le mouillage des navires durant la journée. De plus, des motomarines et des embarcations légères peuvent être louées par les plaisanciers à la plage de l'Alga. La fréquentation de ces zones permet de distinguer six voies de navigation : *Revellata-Citadelle*, *Revellata-Alga*, *Revellata-Oscelluccia*, *Citadelle-Alga*, *Citadelle – Oscelluccia* et *Oscelluccia-Alga*. En plus de ces passages, les embarcations quittent la baie et prennent la direction du large ou de l'île rousse, et inversement. D'une manière plus anodine, durant l'été, l'ouest de la baie de Calvi devient aussi une zone privilégiée par les canadiens lors de leurs entraînements et des ravitaillements en cas d'incendie.

2.3 Présentation des bases de données

La base de données acoustiques utilisée dans ce document est constituée de 685 heures d'acquisition réparties sur différentes périodes de l'année : Avril, Juillet et Novembre. Les données ont été obtenues à différents endroits dans la baie. Des informations complémentaires s'y ajoutent : des données météorologiques, recueillies par les chercheurs de STARESO, des données AIS, fournies par MarineTraffic®, et des données photographiques. Les données photographiques ont été spécifiquement acquises lors de la mise en place d'un protocole de vérité terrain permettant d'identifier le trafic maritime de la baie.

2.3.1 Une base de données acoustique permettant un suivi spatio-temporel

Les 685 heures d'enregistrement acoustique de la base de données exploitée dans ce manuscrit ont été acquises lors de 4 sessions d'enregistrement : Juillet 2015, Septembre 2015, Octobre 2015 et Juillet 2016. Les positions des enregistreurs sont présentées sur la Figure 15.



Figure 15 : Position des enregistreurs

Les sessions Juillet, Septembre et Octobre 2015 sont composées d'enregistrements continus réalisés en une même position de la baie. Les données acoustiques du point 1 ont été obtenues par l'Institut de recherche CHORUS grâce à un partenariat avec STARESO et l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse. Les données acoustiques de la session de Juillet 2016 du point 2, spécifiques à cette étude, sont constituées de 4 enregistrements continus successifs d'une durée de 155 heures, avec une interruption d'1 heure et une autre de 16 heures pour des raisons logistiques. Les quatre mises à l'eau ont été faites sur une embarcation légère à proximité de la pointe de la Revellata et dans un périmètre de 30 m autour du point situé sur la carte.

Ainsi deux points de mesures ont été considérés : un point proche du trafic maritime (point 2) et un point plus éloigné (point 1). Cette configuration en deux points de mesure permet alors d'appréhender les variabilités spatiales induites par le trafic maritime.

L'acquisition des données a été réalisée avec des enregistreurs acoustiques EA-SDA14 RTSYS® de 24 bits d'acquisition et ayant un gain d'amplification de 0 dB. La fréquence d'échantillonnage de 156 250 Hz est commune pour l'ensemble des enregistrements acoustiques. Trois hydrophones HTI (High Tech Inc. ®) 96 et 99, dont la sensibilité est comprise entre -169.5 et -170.2 dB re 1V/ μ Pa, ont été utilisés. La bande passante de ces hydrophones est comprise entre 2Hz et 125 kHz pour les HTI 99 et 2Hz-30kHz pour les HTI 96. La Table 5 ci-dessous reprend les différents éléments caractéristiques à chaque session d'enregistrement.

Date de la session	Type d'enregistrement	Position	Durée d'acquisition	Type hydrophone et sensibilité	Fréquence d'échantillonnage	Hauteur d'eau
Juillet 2015	Enregistrement continu en un point fixe	Point 1 : en face de STARESO	209 heures	HTI-99 SH : -170,2 dB re 1V/ μ Pa	156 250 Hz	30 m
Septembre 2015	Enregistrement continu en un point fixe	Point 1 : en face de STARESO	67 heures	HTI-96 SH : -169,9 dB re 1V/ μ Pa	156 250 Hz	30 m
Octobre 2015	Enregistrement continu en un point fixe	Point 1 : en face de STARESO	254 heures	HTI-96 SH : -169,9 dB re 1V/ μ Pa	156 250 Hz	30 m
Juillet 2016	Enregistrement semi-continu en 4 points proches	Point 2 : à proximité de la Revellata	155 heures	HTI-99 SH : -169,5 dB re 1V/ μ Pa	156 250 Hz	35 m

Table 5 : Caractéristiques des différentes sessions d'enregistrement

Ces sessions ont été réalisées sur deux années, à trois périodes de l'année différentes et à deux positions de la baie. Cette base de données acoustique diversifiée permet d'étudier les variations spatio-temporelles des niveaux acoustiques sur plusieurs échelles :

- La variabilité temporelle à l'échelle de la journée, pour une position au plus proche du trafic, par la comparaison des niveaux acoustiques obtenus durant le jour et durant la nuit en Juillet 2016,
- La variabilité spatiale induite par le trafic maritime estival, par la comparaison des niveaux acoustiques obtenus en Juillet 2015 et Juillet 2016,
- La variabilité temporelle à l'échelle saisonnière, par la comparaison des niveaux acoustiques obtenus en Octobre et Septembre 2015 en Juillet 2015.

2.3.2 Un suivi météorologique quotidien

Les chercheurs de la station STARESO effectuent un suivi quotidien des conditions météorologiques au niveau de la station. Toutes les 20 minutes, un relevé automatique est effectué et permet de connaître :

- La température au mât météorologique de la station, exprimé degrés Celsius,
- La pression atmosphérique, exprimée en hecto Pascals,
- Le pourcentage d'humidité de l'air,
- La radiation solaire, exprimée en watts par mètre carré,
- La direction du vent,
- La vitesse des rafales de vent, exprimée en mètres par seconde,
- La vitesse moyenne du vent, exprimée en mètres par seconde.

Les données météorologiques ont été fournies par les chercheurs de la station STARESO pour l'ensemble de la période considérée.

2.3.3 L'identification du trafic maritime par l'acquisition des données AIS

Le Système Automatique d'Identification (AIS) [InternationalMaritimeOrganization_2001] des bateaux permet aux différents navires et systèmes de surveillance du trafic maritime, d'échanger par liaison radio VHF les informations sur le bateau telles que : son identifiant unique MMSI, son statut de navigation, ses coordonnées GPS, son cap, sa vitesse, etc. Depuis 2004, l'Organisme Maritime International a rendu obligatoire l'émission d'un signal AIS pour tous les navires ayant un tonnage net supérieur à 300 tonnes (navire de classe A). L'AIS reste toutefois optionnel pour tous les autres bateaux, de plaisance ou de faible tonnage (navire de classe B).

Les données AIS émises par les bateaux présents à 3 km autour de la baie durant les enregistrements de juillet 2015 et Juillet 2016 ont été acquises de manière payante auprès de *Marine Traffic*⁴.

2.3.4 La caractérisation du trafic maritime par la mise en place d'un protocole photographique spécifique

Le trafic maritime de la baie de Calvi est principalement composé d'embarcations légères ne possédant pas l'AIS. Afin d'obtenir les informations de présence et de localisation des bateaux que l'AIS ne peut fournir, un protocole spécifique de photographie de la baie depuis un point culminant est proposé dans cette thèse. Ce protocole vise aux renseignements et à la description quantitative du trafic ayant lieu dans la baie. Mis en place du 30 Juillet au 2 août 2015 et de 21 au 28 juillet 2016, ce protocole permet :

- L'identification individuelle de chaque bateau présent dans la baie,
- La cartographie du trafic dans la baie,
- Le dénombrement des passages de bateaux en fonction des routes et des horaires.

Pour satisfaire ces objectifs, un observatoire a été placé sur le toit du Phare de la Revellata. Culminant à 99 m d'altitude au-dessus de la mer, cet observatoire permet d'avoir une vue sur l'ensemble de la Baie. Cet observatoire est composé de deux appareils photographiques grand angle, deux GoPro®, d'un appareil photo avec un zoom performant et d'un ordinateur portable. Le bon fonctionnement de ce protocole de vérité terrain repose sur la synchronisation des différents éléments et de l'enregistreur acoustique.



Figure 16 : Localisation et présentation de l'observatoire GoPro.

Les deux GoPro® ont été utilisées séquentiellement. Fixées à un pied immobile, elles ont permis de prendre des photographies de la baie toutes les 5 secondes. Ces caméras ont des résolutions différentes : 2594x1944 pixels pour la première caméra, et 4000x3000 pixels pour la deuxième caméra. Ainsi, une heure d'acquisition photographique représente entre 1123 et 2952 Mo. Un roulement entre les deux GoPro® a été instauré pour permettre le déchargement des photographies et la recharge des batteries via l'ordinateur portable, en parallèle de l'acquisition par la seconde GoPro® : pour permettre l'acquisition d'une journée entière, 5 à 6 roulements ont été nécessaires. Ces photographies grand-angle permettent de visualiser le trafic maritime sur 6 km². Toutefois, la résolution des photographies ne permet pas l'identification individuelle de chaque bateau. Pour répondre à cette exigence, en parallèle des photographies grand angle, des photographies individuelles de chaque bateau ont été

⁴ <https://www.marinetraffic.com/>

réalisées. La relation entre ces photographies individuelles et les photographies grand angle de la baie a été réalisée par l'intermédiaire d'annotations sur carte. Toutes les 10 minutes, des cartes manuscrites du trafic maritime ont été tracées. A chaque trajectoire de bateau présent dans ces 10 minutes a été associé un numéro. La prise de la photographie individuelle est symbolisée par un point sur chaque carte. A chaque carte a été associé un tableau où figure le numéro de la trajectoire, le numéro de la photographie individuelle et des annotations sur le type de bateau. En dessous de chaque tableau une frise chronologique permet d'annoter l'heure d'apparition ou de disparition d'un bateau. Les cartes manuscrites ont aussi permis de dénombrer le nombre de bateaux traversant la baie, et d'estimer grossièrement le nombre de bateaux passant à proximité de l'enregistreur (Figure 17).



Figure 17 : Exemple de carte manuscrite

La surveillance du trafic maritime a été réalisée entre 7h50 et 19h20. En raison de la forte présence touristique au niveau du phare de la Revellata, une coupure est observée entre environ 12h40 et 13h40. Ce protocole d'étude du trafic maritime a permis d'obtenir :

- Pour la session de Juillet-Aout 2015, 62 Go de photographies grand angle de la baie, correspondant à 30 heures de surveillance de la baie et environ 1400 photographies individuelles de bateaux.
- Pour la session de Juillet 2016, 134 Go de photographies grand angle de la baie, correspondant à 64 heures de surveillances de la baie, et d'obtenir plus de 3 000 photographies individuelles de bateaux.

De plus, pour permettre la géolocalisation des photographies GoPro®, un traceur GPS a été installé sur le bateau de STARESO, permettant ainsi en post-traitement d'associer à un pixel de l'image, des coordonnées GPS.

2.4 Conclusion

Les données ont été acquises au cours de quatre sessions d'enregistrements acoustiques qui se sont déroulées à deux endroits sur trois mois non consécutifs et de deux sessions d'observations photographiques de la baie. Une analyse dissociée et / ou mixte de la base de données de vérité terrain et de la base de données acoustique permet de créer 5 bases de données. Ces bases de données seront présentées et exploitées à travers les différents chapitres de cette thèse. La Figure 18 synthétise la structure et le contenu des cinq bases de données, créées à partir de ces données brutes, qui m'ont permis la réalisation de cette thèse.

Durant les heures de surveillance de la baie de la session de Juillet 2016, 2855 traversées de bateaux ont été annotées, dont 1181 passant à proximité de la pointe de la Revellata. Sur cette même durée de surveillance, l'analyse des données acoustiques a permis de déceler la présence de 871 sessions de bruits associés à des passages de bateau. Ce nombre représente alors 30,50 % du nombre total de passages de bateaux observés et 73,75 % du nombre de bateaux passant à proximité de la pointe de la Revellata.

Le chapitre suivant présente l'analyse des bases de données photographiques et la méthode mise en œuvre pour établir les cartes du trafic maritime à partir des photographies de la baie. Les performances de cette méthode seront illustrées par le dénombrement des bateaux et la précision de leur localisation individuelle au sein de la baie.

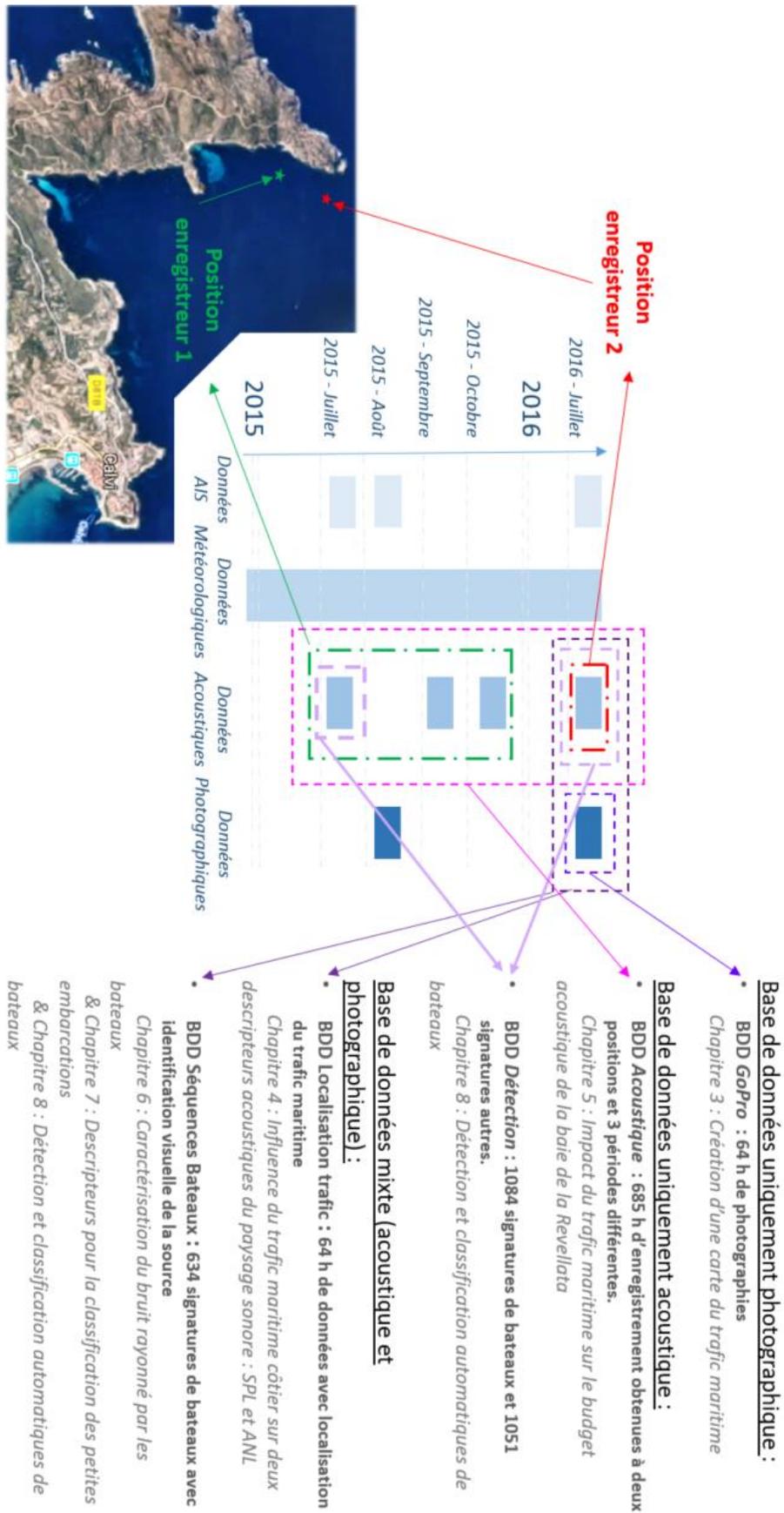


Figure 18 : Synthèse sur les bases de données créées

Partie 2 : Caractérisation du trafic maritime côtier pour le suivi environnemental

Le trafic maritime est le principal contributeur des bruits sous-marins anthropique. L'intensification du trafic hauturier modifie le paysage acoustique [McDonald_2006, McDonald_2008, Andrew_2011]. En 2010, en réponse à cette préoccupation, la *Directive Cadre pour la Stratégie pour le Milieu Marin* DCSMM [EuropeanCommission_2010] recommande un suivi de niveaux acoustiques estimés dans des bandes de fréquences spécifiques. L'implication du trafic maritime dans ces bandes de fréquence est mise en avant dans [Ross_1976, Tasker_2010] pour le trafic hauturier. Grâce aux données AIS, le trafic hauturier peut être localisé en direct. Dans un cadre d'étude sur le bruit rayonné des bateaux, cette identification du trafic permet d'associer ces données à des modèles de propagation du bruit rayonné et de générer des cartes modélisant le bruit ambiant [Erbe_2012, Erbe_2014, Maglio_2015, Gervaise_2015]. Différentes normes spécifient la méthode de mesure de bruit rayonné de grandes embarcations : ANSI-ASA S12.64 [AmericanNationalStandard_2009] et ISO 17208-1 [InternationalStandardizationOrganization_2016].

A ce jour, peu d'études s'intéressent aux effets sur le paysage acoustique de l'augmentation de l'activité côtière et aux bruits rayonnés par les petites embarcations alors que les environnements côtiers sont les pourvoyeurs de 41.7 % des services écosystémiques produits par les océans [Costanza_2014]. De par l'absence de données AIS, permettant la localisation des embarcations, l'étude acoustique des flottilles côtières se complexifie. En effet, il est à noter que l'ensemble des cartes de trafic maritime réalisées à ce jour est élaboré en n'utilisant comme données d'entrée que les données AIS des bateaux. La problématique d'un suivi environnemental côtier amène à se poser des questions :

- *Est-il possible d'identifier et de localiser visuellement les bateaux dans un contexte côtier ?*
- *Quels descripteurs acoustiques sont les plus adaptés à ce type d'environnement et quelles informations apportent-ils sur le trafic maritime ?*
- *Quelle est la part anthropophonique dans le budget acoustique des environnements côtiers ?*

Cette partie se décompose en un recueil de trois chapitres. Le **chapitre 3** considère la question de la localisation du trafic maritime. Un algorithme de détection et géolocalisation par traitement d'images est présenté. Cet algorithme permet alors de positionner les bateaux et de tracer des cartes du trafic maritime côtier. Les **chapitres 4 et 5** aborderont la problématique du trafic côtier d'un point de vue acoustique. Le **chapitre 4** est dédié à l'étude de deux descripteurs acoustiques. Le **chapitre 5** réalise un suivi spatio-temporel de ces descripteurs dans un objectif de caractérisation de l'influence du bruit rayonné par les embarcations côtières dans le paysage acoustique.

3 Chapitre 3 : Localisation et création de carte du trafic maritime par traitement d'images

Table des matières

3.1	Introduction.....	48
3.2	Problématique : une flottille de très petites embarcations sans l'AIS.....	49
3.3	Etat de l'art sur l'utilisation de caméra pour la cartographie, la correction des distorsions dues à l'effet grand angle et la détection d'objets en mouvement.....	50
3.4	Présentation de la méthode.....	53
3.4.1	Vue d'ensemble de la méthode	53
3.4.2	Etape 1 : la détection des bateaux par traitement d'images	53
3.4.3	Etape 2 : la création des cartes pour une période donnée	56
3.4.4	Etape 3 : la calibration et géolocalisation	56
3.4.5	Etape 4 : la projection des détections sur la carte	58
3.4.6	Le dénombrement du nombre de bateaux	59
3.5	Les performances de la méthode.....	59
3.5.1	Les limite de la détection par traitement d'images	59
3.5.2	Performance de relocalisation	60
3.5.3	Performance globale de la méthode et zone d'exclusion	65
3.6	Analyse du trafic maritime de la baie.....	65
3.6.1	Analyse intra-jour : un trafic maritime rythmé par les plaisanciers.....	66
3.6.2	Analyse du trafic à l'échelle journalière	69
3.6.3	Analyse du trafic sur l'ensemble de la semaine	70
3.6.4	Un trafic maritime constant entre les sessions de 2015 et 2016.....	71
3.7	Discussion	71
3.8	Conclusion	72

3.1 Introduction

La localisation du trafic maritime est devenue un enjeu majeur aussi bien en termes de régulation du trafic maritime, de sécurité et de suivi environnemental. Cette considération vise principalement le trafic maritime hauturier comme en témoigne l'obligation d'équiper avec un AIS les grandes embarcations hauturiers (voir 2.3.3 – p 38). Des réglementations apparaissent en ce qui concerne le trafic maritime fluvial : depuis 2014, les bateaux de type Classe A *Inland* (bateaux de plus de 20 m et/ou transportant plus de 12 personnes) doivent être équipés d'AIS. En milieu hauturier, des atlas représentant le trafic maritime permettent d'observer les routes maritimes, de quantifier le trafic et de suivre son évolution temporelle [Simard_2014]. Parallèlement, le retrait des zones glaciers apporte de nouveaux questionnements sur l'évolution des routes maritimes dans les décennies à suivre. Dans un cadre d'étude sur le bruit rayonné des bateaux, cette identification du trafic permet un suivi environnemental : l'association ces données à des modèles de propagation du bruit rayonné permet de générer des cartes modélisant le bruit ambiant [Erbe_2012, Erbe_2014, Gervaise_2015, Aulanier_2016, LeCourtois_2017, Aulanier_2017]. Cependant, l'ensemble des cartes réalisées à ce jour est élaboré en n'utilisant comme données d'entrées que les données AIS des bateaux alors que les bateaux composant la flottille côtière sont principalement de petites embarcations non équipées d'un AIS.

Les travaux réalisés dans cette thèse reposent sur des enregistrements acoustiques réalisés à deux positions de la baie de Calvi. Dans un contexte d'étude du bruit rayonné par des bateaux, la connaissance de la distance entre la source et le récepteur est nécessaire. Ainsi il est possible de se demander :

- *Quelle est la proximité du trafic maritime par rapport à chaque position d'enregistreur acoustique ?*
- *Est-il possible d'estimer la distance entre un point d'enregistrement et le positionnement d'un bateau par un moyen autre que l'AIS ?*

Pour répondre à ces questions, un protocole de surveillance visuelle de la baie a été mis en place et présenté dans le chapitre 2 (voir 2.3.4 - p39).

Ce chapitre est divisé en 6 sections. La première section décrit la problématique d'étude liée à la baie : durant la saison estivale, seul 3.7 % des bateaux traversant la baie sont équipés d'un AIS. La seule utilisation de ces données ne permet pas de visualiser correctement le trafic présent dans un environnement côtier. La deuxième section de ce chapitre a pour objectif de faire un état de l'art sur l'utilisation de caméra sportive pour la cartographie d'un milieu, la correction des distorsions liées à l'effet Fish-eyes présent sur les caméras grand-angle et la détection de mobiles par traitement d'images. Au sein des différentes méthodes mises en œuvre, la calibration des images par étude des lignes colinéaires et la détection de mouvements par seuillage local adaptatif ont paru être les méthodes alliant rapidité et simplicité de mise en œuvre et de bonnes performances. La troisième section présente l'algorithme de création de carte du trafic maritime par traitement d'images. Cet algorithme comporte 4 étapes : la détection de mobilité des bateaux, la création d'images binaires de détection, l'estimation des distorsions de chaque caméra et le géoréférencement des images. Une méthode empirique d'estimation des distorsions des caméras et de géolocalisation des images est proposée. Cet algorithme est innovant par son application pour la description quantitative du trafic maritime. La quatrième section est consacrée aux performances de l'algorithme en termes de détection par traitement d'images et de relocalisation. Les performances de relocalisation sont estimées par un calcul théorique lié aux choix de la méthode et en utilisant les traces GPS d'un bateau. La cinquième section présente les cartes du trafic maritime obtenues sur différentes échelles

temporelles : l'heure, la journée et la semaine. Ces cartes sont commentées et comparées à l'observation réalisée sur le terrain.

3.2 Problématique : une flottille de très petites embarcations sans l'AIS

La flottille présente dans la baie de Calvi est composée de bateaux liés au tourisme et destinés à 4 types d'usages : les activités récréatives (jet-ski, semi-rigide), les activités de plaisance (open-coque, vedette), les activités de croisière (Voilier, Yacht) et les activités de transport touristique (navette côtière ou navire de haute mer). Les statiques présentées ci-dessous ont été réalisées par étude des photographies individuelles. Ainsi, la taille des bateaux présents dans la baie varie de 2,7 m à 177 m. L'analyse des photographies individuelles de l'ensemble des bateaux présents dans la baie durant la session de manipulation terrain de Juillet 2016, permet de caractériser les proportions de chaque catégorie de bateaux. Pour se faire, cette flottille est décomposée en 8 groupes définis pour cette étude principalement par des critères de taille et d'usage. Les catégories sont : les jets ski (3m de long), les semi-rigides (de 7 à 15 m de long), les petites embarcations de pêche-plaisance (4 m à 20 m de long), les embarcations de croisière de moyenne taille de type Vedettes ou petit Yacht (de 20 à 50 m de long), les embarcations de croisière de grande taille de type Yacht (de plus de 50 m de long), les voiliers, les navettes côtières (de 24 m de long) et les ferries (177m de long). La Figure 19 représente les proportions de chaque catégorie.

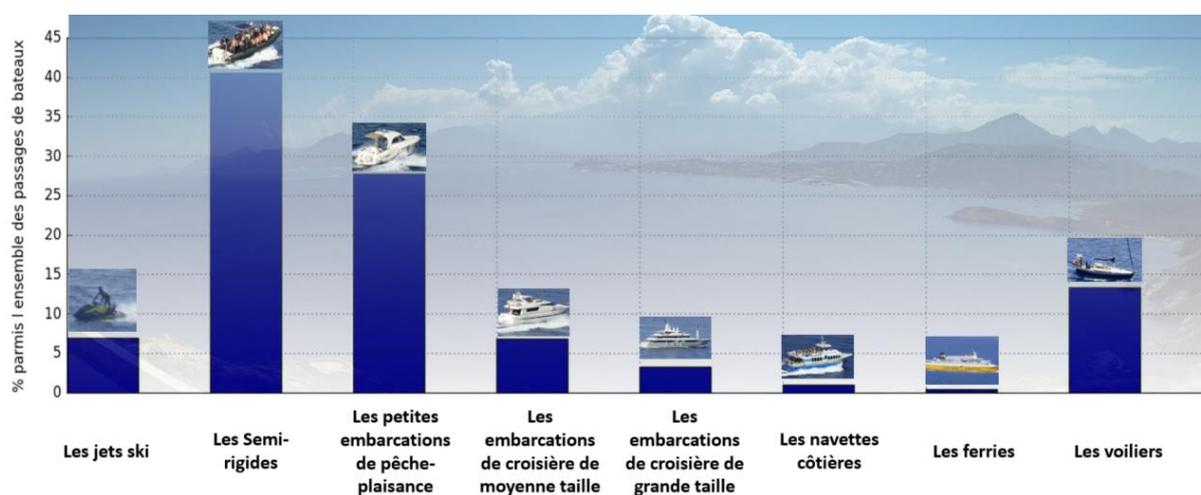


Figure 19 : Proportions de chaque catégorie de bateaux parmi 2943 bateaux

Les embarcations de moins de 20 m de longueur représentent 75,13 % des bateaux traversant la baie. Les petites embarcations sont composées de trois catégories : les jet-skis, les semi-rigides et les embarcations à coque-rigide, regroupant entre autres les open-coques, offshores et les pêche-promenades. Les petites embarcations présentes dans la baie sont majoritairement représentées par des bateaux de type semi-rigide. Ils représentent 53,87 % des petites embarcations, soit 40,47 % de la totalité des bateaux traversant la baie. 9,18% des petites embarcations sont des jet-skis et 36,95 % des petites embarcations ont une coque rigide. La famille des voiliers est la troisième catégorie de bateaux la plus représentée dans la baie avec 13,39 % des bateaux photographiés. Plus de 90% des voiliers traversent la baie en utilisant leur moteur. Cet élément est nettement identifiable lorsqu'aucune voile n'est grée sur le bateau, ou lorsque les voiles ne sont pas bordées. 10,09 % des bateaux traversant la baie sont des embarcations de type Yacht à moteur ou Vedette. Parmi ces embarcations de luxes, un peu moins d'un tiers ont une longueur supérieure à 20 m (32,01%). Cette population de super Yachts représente alors 3,23 % des traversées effectuées dans la baie. Comprenant seulement 1,39 % du nombre totale de bateaux, l'activité de transport touristique occupe une faible proportion des traversées effectuées dans la baie. Cette activité est composée, pour un peu plus de deux tiers, de moyennes embarcations de type navette côtière (68,34% des traversées liées au transport de

passagers) et, pour un peu moins d'un tiers, de grandes embarcations de type ferry traversant la méditerranée (31,65% des traversées liées au transport de passagers).

L'analyse des cartes manuscrites du trafic maritime a permis de calculer le nombre de bateaux traversant la baie : 2855 traversées ont été répertoriées durant les heures de surveillance de la baie en Juillet 2016. Parallèlement, l'analyse des 1262 messages AIS transmis durant les heures de surveillance de la baie, permet d'identifier 76 bateaux sur la zone d'étude, correspondant à 106 passages dans la baie. Seul 3,7 % des bateaux traversant la baie utilise un émetteur AIS. L'identifiant MMSI de ces 76 bateaux donne leurs caractéristiques : 5,2 % sont des navires de transport de passagers en haute mer ou des navettes dédiées à un tourisme côtier, 38,5 % sont des voiliers et 56,3 % sont des embarcations luxueuses de plaisance de type yacht et vedettes. Les bateaux utilisant l'AIS empruntent majoritairement (88,6 %) le rail « Revellata-Citadelle ». La carte du trafic maritime issue de ces données AIS est représentée sur la Figure 20. Sur cette figure, la terre est représentée en noir et la mer en bleu. Chaque ligne claire représente les positions GPS consécutives d'un même bateau extraites des émissions AIS.

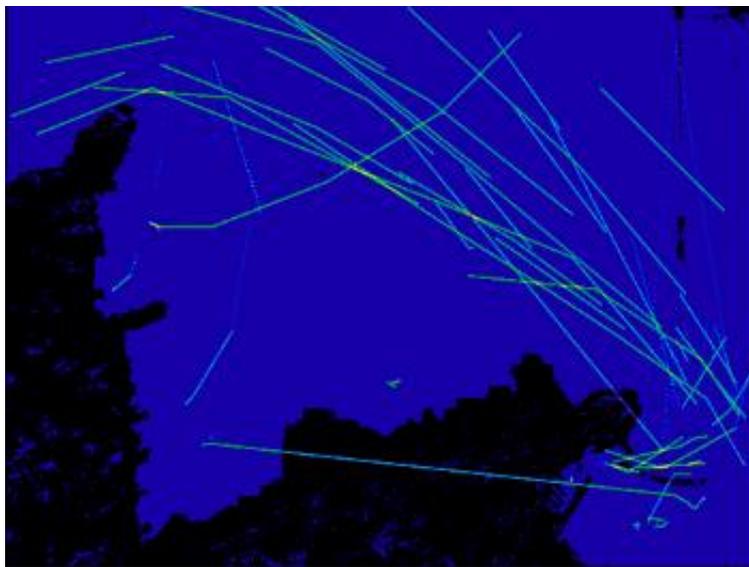


Figure 20 : Carte du trafic maritime durant la session de Juillet 2016 réalisée en considérant uniquement les données AIS.

Ces informations confirment le fait que le monitoring d'une flottille d'embarcations côtières ne peut être réalisé en regardant seulement la donnée AIS. La mise en place d'un protocole de caractérisation photographique de la baie a été nécessaire pour pouvoir identifier le trafic maritime de cette baie.

3.3 Etat de l'art sur l'utilisation de caméra pour la cartographie, la correction des distorsions dues à l'effet grand angle et la détection d'objets en mouvement

L'utilisation de caméra pour la cartographie d'un milieu se démocratise dans la communauté scientifique. La caméra est généralement fixée à un drone volant *Unmanned Aerial Vehicle* équipé d'un récepteur GPS. Cette méthode d'acquisition permet de photographier sous un angle de 90° avec la terre. Le géoréférencement des images est principalement réalisé à l'aide d'un logiciel de Système d'Information Géographique : ArcGIS® [Flynn_2014], Quantum GIS® [Ezequiel_2014]. [Casella_2017] réalise une cartographie de la côte de la Polynésie française en utilisant une caméra de type GoPro® HERO4. Pour s'affranchir de l'effet Fish Eyes, la lentille de la caméra a été modifiée. [Flynn_2014] utilise une caméra GoPro® HERO3 pour localiser une algue verte présente dans les rivières du Montana : la distorsion des images est corrigée en utilisant une Toolbox Matlab® *Camera Calibration Toolbox* développée par [Bouguet_2013] inspiré des travaux de [Kannala_2006] (voir ci-dessous).

Les méthodes présentées utilisent principalement des drones volants, équipés de caméra formant un angle de 90° avec la terre, facilitant alors l'analyse des images et leurs géoréférencement. Pour cette thèse, ces méthodes ne sont pas applicables telles quelles. Un test de géolocalisation des images GoPro® a été réalisé en utilisant le logiciel Quantum GIS® et en choisissant des amers. Cette méthode n'a toutefois pas été retenue pour deux raisons. La géolocalisation est réalisée par annotation manuelle de chaque image. Les résultats observés présentaient de fortes distorsions de l'image dues à l'inclinaison de la caméra et aux déformations *Fish-eye* des caméras.

Dans la communauté des acousticiens, les données GPS et AIS restent une valeur sûre et l'utilisation de caméra pour la détection de bateaux est marginale. Lors d'une étude du bruit rayonné par les bateaux dans la baie de Moray, [Merchant_2014] utilise une caméra en complément des données AIS. Cette caméra lui permet de détecter et d'identifier les bateaux, mais pas de les localiser. De même, lors d'une étude sur la localisation de plongeurs par acoustique, [Fillinger_2012] utilise une caméra pour détecter les bruiteurs parasites présents dans la zone d'étude. La détection de bateaux par traitement d'images est combinée à une localisation acoustique du bateau réalisée par un sonar pour [Wang_2015]. Dans le domaine acoustique lié à la défense, le potentiel des caméras en tant qu'outils de localisation est pleinement utilisé par [Bunin_2008] et [Sutin_2010]. La détection et le suivi des bateaux en temps réel nécessitent plusieurs caméras. La calibration et le géoréférencement des images ont été réalisés empiriquement en utilisant un bateau équipé d'un récepteur GPS haute précision. La création d'une carte du trafic maritime à partir de données photographiques est un sujet non abordé à ce jour.

Dans la communauté de traitement d'image, la correction des distorsions dues à l'effet grand angle subies par une image est abordée de différentes façons. Les premiers travaux ont porté sur la correction d'images en utilisant un « *a priori* » sur la scène photographiée ou la caméra utilisée. Ainsi, plusieurs études s'emploient à corriger ces distorsions en utilisant des modèles de déformation [Nomura_1992, Micusik_2003, Kannala_2006]. Par exemple, [Kannala_2006] réalise une modélisation de la lentille basée sur l'approximation d'un modèle radialement symétrique inspiré par les projections de type équidistant, où la projection en perspective est modélisée par une fonction polynomiale d'ordre 9 dépendant de l'angle formé par le rayon entrant et l'axe principal. Un certain nombre d'auteurs propose une seconde approche de la correction des distorsions subies par une image sans utiliser d'informations provenant du monde réel. Dans le cas d'un traitement multi-images, [Stein_1997, Kukelova_2011] présentent des méthodes d'auto calibration des distorsions radiales en utilisant des points de correspondances entre deux images. Lorsqu'une seule image est étudiée, l'étude des motifs d'une image permet d'estimer les déformations provoquées par la caméra. Ainsi, [Ying_2006] propose une calibration conique en utilisant un objet originalement sphérique. D'autres études exploitent la présence de lignes droites : [Prescott_1997] propose une méthode basée sur la détection et l'estimation des coefficients de distorsion de segments arqués répliquant dans la réalité des droites rectilignes. Des arcs de cercles de taille plus faible sont utilisés par [Bräuer-Burchardt_2001] et [Benligiray_2016]. Ce dernier regroupe et sélectionne les segments correspondant à des lignes initialement colinéaires.

La Toolbox Matlab® *Camera Calibration Toolbox* propose une correction des déformations dues à l'effet grand-angle et génère de nouvelles images non déformées. Dans le cas présent, l'utilisation de cette Toolbox provoque une forte augmentation de la taille de la base de données déjà conséquente. De plus, pour cette thèse, l'objectif de ce traitement n'est pas de corriger automatiquement les distorsions produites par les caméras, mais seulement de comprendre ces déformations afin de repositionner le bateau. La Toolbox Matlab® n'a donc pas été utilisée. Les caméras sont positionnées en un point fixe, les méthodes multi-image exploitant le mouvement de la caméra ne peuvent être

envisagées. Dans notre cas, la compréhension des déformations est appliquée sur un jeu réduit de données et des caméras précises, dont il est possible de réaliser des calibrations à partir de données réelles. La visualisation d'un ensemble de photos de calibration confirme la correspondance entre les lignes droites présentes dans la réalité et les courbes arquées observées sur les photographies. Simple à mettre en œuvre et ne nécessitant pas d'information sur les déformations de la lentille où sur les modèles de distorsions, la méthode proposée par [Prescott_1997] est retenue. Ainsi, une estimation empirique des équations de déformation des deux caméras est faite par l'étude des courbes correspondant initialement à des droites colinéaires.

La détection de mouvement est un domaine d'étude vaste pouvant être séparé en quatre familles [Verbeke_2007]. La première famille est la détection sans modélisation de l'arrière-plan. Elle consiste à détecter les mouvements en tout point de l'image par le biais d'une fonction mathématique telle que la dérivée temporelle, correspondant à une soustraction d'images [Tian_2005], l'entropie spatio-temporelle de l'image [Guo_2004] et la norme du flot optique représentant la projection sur le plan image du mouvement observé [Liu_1998]. La deuxième famille est la modélisation locale de l'arrière-plan et consiste à estimer et modéliser en tout point de l'image l'arrière-plan. Cette modélisation est propre à chaque pixel et est basée sur des modèles statistiques, distributions gaussiennes [McKenna_2000] et de mélanges de gaussiennes [Stauffer_1999], ou des modèles prédictifs, filtre de Wiener [Toyama_1999] ou de Kalman [Karmann_1990]. La troisième famille est la modélisation semilocale de l'arrière-plan. Comme précédemment, cette méthode consiste à modéliser l'arrière-plan par des modèles statistiques ou probabilistes. Dans ce cas, le modèle n'est pas estimé en un point, mais en considérant les pixels autour de ce point. Certaines études utilisent des modèles de Markov caché [Rabiner_1989] pour déterminer s'il y a une détection. Cette méthode peut être appliquée à l'échelle d'un ensemble de pixels [Rittscher_2000] ou pour caractériser une texture [Stauffer_1999]. Pour la dernière famille, la modélisation globale de l'arrière-plan, l'arrière-plan est modélisé en utilisant l'ensemble de l'image. La détection est alors réalisée par analyse d'images successives [Oliver_2000] ou en analysant le changement du modèle : par comparaison de modèles locaux au modèle global [Toyama_1999] ou par utilisation de modèles de Markov caché [Strenger_2001].

Dans cette thèse, différentes méthodes de détection des bateaux en mouvement ont été testées : la dérivée temporelle à l'ordre 1 suivie de l'estimation globale et semilocale de l'arrière-plan. La méthode retenue s'inspire d'une détection sans modélisation de l'arrière-plan (la dérivée temporelle à l'ordre 10) et d'une modélisation semilocale de l'arrière (la segmentation en maille de la dérivée des images et en modélisant chaque maille par une loi gaussienne).

3.4 Présentation de la méthode

3.4.1 Vue d'ensemble de la méthode

La méthode de création de carte du trafic maritime est composée de 4 étapes, la Figure 21 en présente le schéma. Le traitement d'images permet de détecter des bateaux sur les enregistrements des caméras. La différence entre deux images consécutives est utilisée pour identifier les bateaux en mouvement. La distribution obtenue par les différences de 11 images successives dans des mailles de l'image permet alors d'estimer un seuil de détection fixé par une probabilité de fausse alarme. Une fois détectée, les positions des bateaux sont enregistrées dans des matrices binaires de détection, puis sommées pour obtenir l'image correspondant au trafic maritime pour une période donnée : heure, jour et ensemble des données de vérité terrain. Une étape de calibration et de géolocalisation des images de chaque session est ensuite réalisée. Chaque pixel des images des caméras est ainsi relié à une position sur une carte de la baie. Ce positionnement est réalisé en considérant des lois expérimentales permettant de caractériser les déformations induites par l'effet grand angle des caméras et le géoréférencement d'amers. Les fonctions de géoréférencement permettent alors de reporter ces images cumulées de détection sur la carte de la baie et d'afficher les cartes du trafic maritime de la baie.

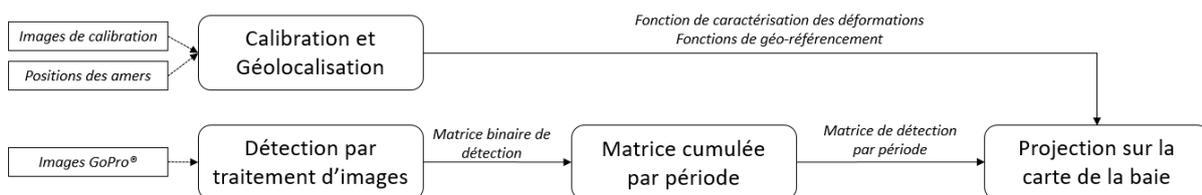


Figure 21 : Schéma blocs des étapes de la méthode

3.4.2 Etape 1 : la détection des bateaux par traitement d'images

L'algorithme de détection automatique des bateaux est réalisé en se basant sur une détection de mouvement. Cette détection de mouvement est composée de 7 étapes présentées dans la Figure 22. 11 images consécutives sont considérées, elles correspondent à un suivi de la baie durant 60 secondes. Une image couleur est décomposée en trois matrices de couleur rouge, verte et bleue. La différence de deux images consécutives est évaluée à partir de ces trois couleurs afin d'extraire le pixel correspondant à un mouvement. Un maillage est appliqué à chaque différence entre les images (taille 50x50 pixels). L'étude des valeurs des différences obtenues dans chaque maille est faite à partir de 10 différences d'images d'une même couleur. Deux seuils par maille sont estimés avec la méthode détaillée ci-dessous. La détection de mouvement est réalisée en effectuant un seuillage sur chaque maille pour chaque différence d'images. La convergence des trois images de chaque couleur en une seule image binaire est assurée en utilisant l'opérateur logique « ou ». Le lissage des formes et la suppression des pixels isolés sont réalisés par application d'une ouverture.

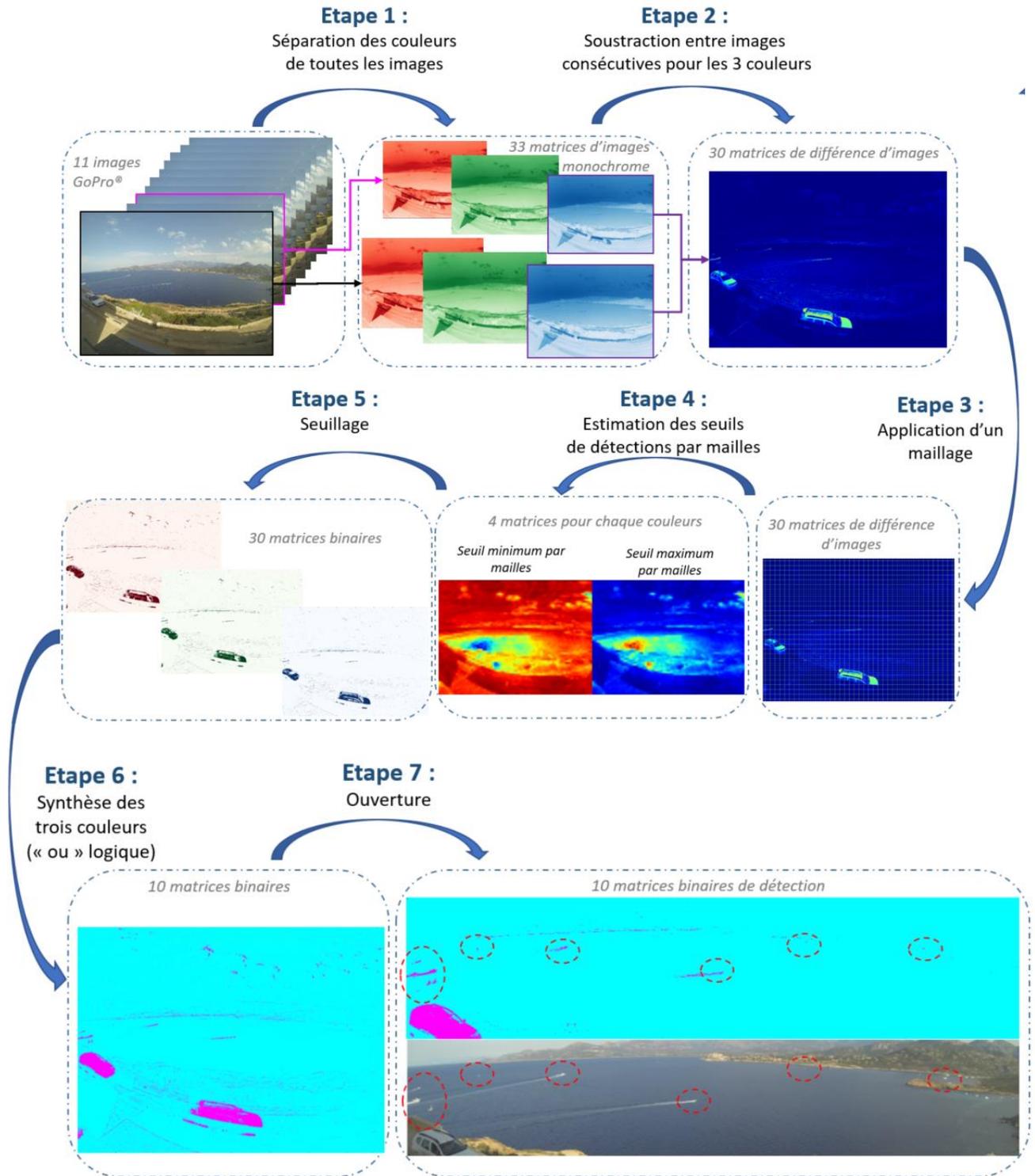


Figure 22 : Méthode de détection des bateaux par traitement d'images

Lors de l'étape 4, deux seuils sont estimés pour chaque maille de la différence d'images. En effet, dans chaque maille, la distribution des 10 différences d'images est assimilable à une distribution de type gaussienne à moyenne non nulle. Une estimation du pied de bruit gaussien basée sur la méthode des quantiles [Kinda_2013, Mathias_2016] permet d'estimer la moyenne μ_m et la variance σ_m de la distribution de chaque maille :

$$\mu_m = \frac{\text{erf}^{-1}(2(Q-Q_i)-1) \cdot \text{Percentil}(\delta_m, Q+Q_i) - \text{erf}^{-1}(2(Q+Q_i)-1) \cdot \text{Percentil}(\delta_m, Q-Q_i)}{\text{erf}^{-1}(2(Q-Q_i)-1) - \text{erf}^{-1}(2(Q+Q_i)-1)} \quad \text{- Équation 4}$$

$$\sigma_m = \frac{1}{2} \left(\frac{\sqrt{2} \cdot \text{erf}^{-1}(2(Q-Q_i)-1)}{\text{Percentil}(\delta_m, Q+Q_i)} - \frac{\sqrt{2} \cdot \text{erf}^{-1}(2(Q+Q_i)-1)}{\text{Percentil}(\delta_m, Q-Q_i)} \right) \quad \text{- Équation 5}$$

Avec :

- $Q = 0,5$ et $Q_i = 0,15$
- δ_m la distribution de différence pour la maille m.

Les seuils sont estimés en considérant une probabilité de fausse alarme constante (*CFAR Constante False Alarm Rate*) fixée à 10^{-12} . La moyenne de ces distributions étant non nulle, deux seuils sont considérés et fixés par une probabilité de fausse alarme :

$$\begin{aligned} \text{Threshold}_{low} &= \mu_m - \sigma_m \sqrt{2} \cdot \text{erf}^{-1}(P_{fa}) \\ \text{Threshold}_{high} &= \mu_m + \sigma_m \sqrt{2} \cdot \text{erf}^{-1}(P_{fa}) \end{aligned} \quad \text{- Équation 6}$$

La Figure 23 représente l'estimation de la moyenne, de la variance et des seuils positifs et négatifs pour chaque maille, obtenues en considérant les 10 différences images associées à une couleur. La moyenne et la variance des distributions différentes en fonction des mailles. Ainsi, au premier regard sur ces matrices, il est possible de retrouver les différents éléments caractéristiques des photographies (la baie, les nuages et les éléments de relief) mais une résolution grossière. Cette résolution grossière est due au choix du maillage.

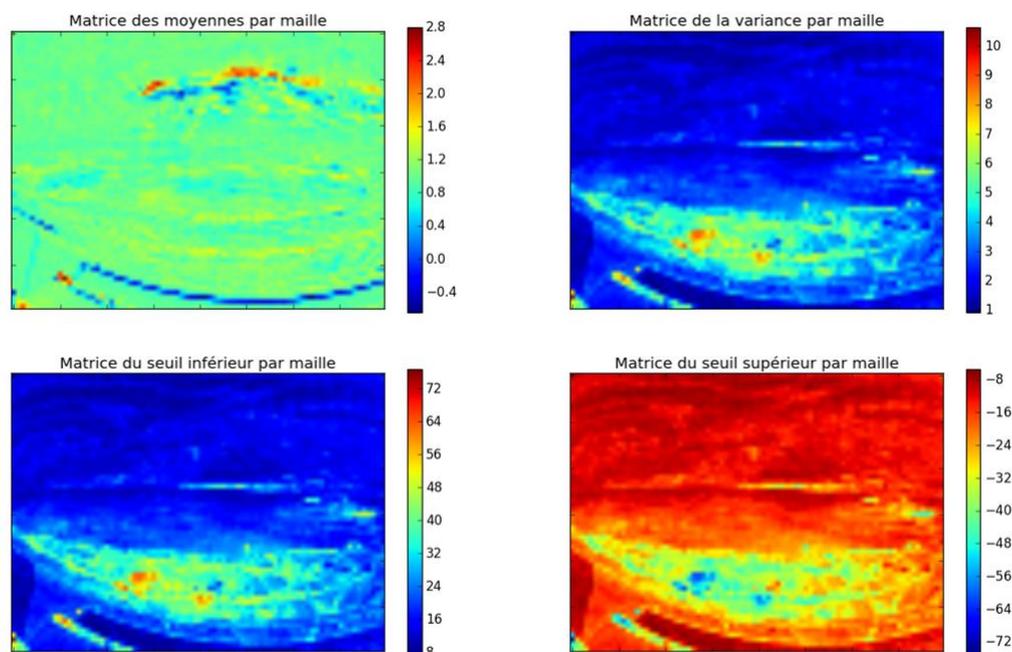


Figure 23 : Exemple d'estimation de la moyenne, de la variance et des seuils pour une session de 10 différences d'images, en considérant la couleur rouge, un maillage 50x50 pixels et une P_{fa} de 10^{-12}

L'objectif des travaux réalisés dans ce chapitre de thèse est de localiser le trafic maritime d'un point de vue global et sur une longue durée. Cette méthode de détection répond à cet objectif et permet d'identifier la position de l'ensemble des bateaux à un instant donné, puis sur une longue période par sommation des cartes binaires (voir étape 2 - 3.4.3 - p56). Cette méthode de détection laisse entrevoir la possibilité d'isoler chaque bateau et de suivre leur trace dans le temps ou d'identifier le nombre de bateaux présents dans une zone donnée. Ces thématiques ne sont toutefois pas abordées dans cette thèse.

3.4.3 Etape 2 : la création des cartes pour une période donnée

Chaque image binaire de détection est alors sauvegardée. Ces images sont alors sommées pour obtenir l'image correspondant au trafic maritime pour une période donnée : heure, jour et ensemble des données de vérité terrain. Deux types d'opération peuvent être réalisés, une somme logique et un histogramme 2D. La somme logique permet d'identifier les pixels où un bateau est présent, alors que la somme classique permet de compter le nombre de fois où une détection a été réalisée par pixel. Dans le cas de la réalisation d'une carte du trafic maritime, l'utilisation de l'histogramme 2D est privilégiée. La Figure 24 ci-dessous montre un exemple de matrice de détection obtenu pour 1 heure d'enregistrement en considérant un histogramme 2D. Sur cette carte, plus la couleur est chaude, plus le nombre de détections par pixel est élevé.

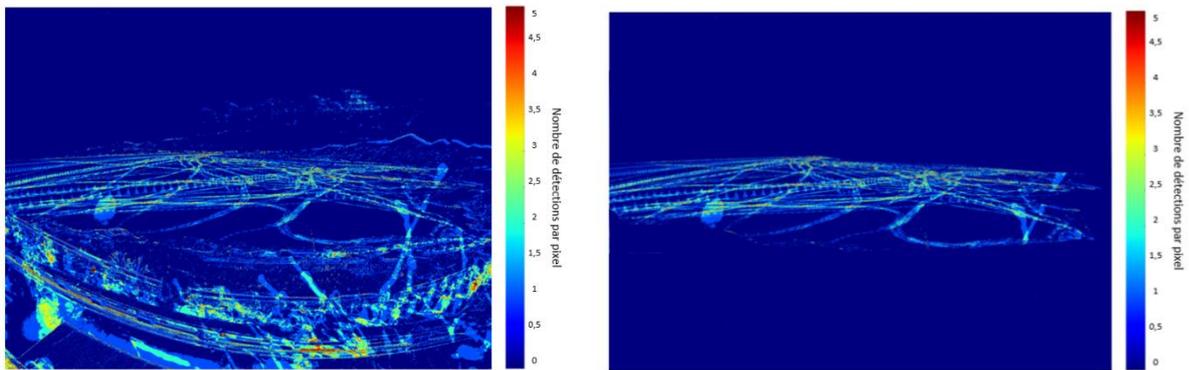


Figure 24 : Carte de détection pour 1 heure de données de l'ensemble des images GoPro® (à gauche) et avec sélection des zones maritimes (à droite)

3.4.4 Etape 3 : la calibration et géolocalisation

La calibration et la géolocalisation des deux caméras est réalisée de manière empirique par le biais de trois lois : la première loi permet de caractériser les déformations de chaque caméra, alors que les deux autres lois permettent le géoréférencement des images.

Ayant une distance focale très courte, les caméras de type GoPro® permettent d'avoir un angle de champ très ouvert. Cette particularité provoque cependant une déformation de l'image, connue des amateurs de photographie sous le terme d'effet *Fish-eyes*. Cette distorsion provoque une courbure de toutes les lignes droites ne passant pas par le centre de l'image. Pour chacune des deux caméras (A et T), une photographie de référence a permis d'établir les équations des déformations dues à cet effet *Fish-eyes*. Durant cette phase de calibration, l'angle d'inclinaison des caméras correspond à l'angle d'inclinaison utilisé lors de l'expérimentation. Ces images de référence sont parcourues par 9 lignes droites colinéaires et horizontales, dans la réalité, transformées en « courbes arquées » en raison des distorsions provoquées par les caméras. Dans cette thèse, il a été choisi de modéliser ces courbes arquées par un modèle simple : une fonction polynomiale d'ordre 2. Plus le centre de la parabole est éloigné du centre de l'image, plus la courbure de la parabole sera prononcée. Pour les 9 courbes, le coefficient du polynôme d'ordre deux, caractérisant la courbure de la parabole, est alors estimé. Une régression linéaire relie alors ce coefficient au nombre de pixels séparant, le centre de la parabole au centre de l'image. Les pourcentages de variances capturés par ces régressions linéaires R^2 sont alors

de 99,36% pour la GoPro® A, et de 98,38% pour la GoPro® T. Un maillage composé de paraboles est appliqué à l'image GoPro® (Figure 25). Ce maillage est réalisé en considérant un espacement de 1 pixel entre les extremums (minimum ou maximum) de chaque parabole : le coefficient d'ordre deux de chaque parabole respecte la loi empirique de déformation trouvée précédemment.

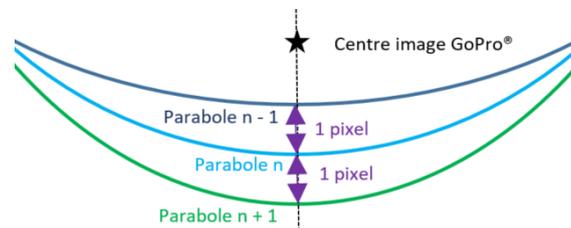


Figure 25 : Maillage des images GoPro®

Le positionnement d'un pixel de l'image sur cette carte de la baie est réalisé en considérant 7 points fixes du paysage appelés amers facilement identifiables sur les deux images : le phare de STARESO, la pointe de *Oscelluccia*, les deux pointes de la citadelle, l'extrémité de la plage *Oscelluccia*, deux groupes de rochers présents entre la pointe de STARESO et la plage de *Oscelluccia*. Ce géoréférencement est composé de deux fonctions. Les variables utilisées par ces deux fonctions sont présentées dans la Figure 26.

- La première fonction permet de faire correspondre les paraboles du maillage présent sur l'image GoPro® aux lignes droites présentes sur la carte de la baie. Cette fonction est obtenue par régression linéaire entre l'indice de la parabole où est présent chaque amer et l'inverse de la distance $D_{ortho_{min}}$ minimale entre le positionnement de l'appareil et la droite linéaire passant par l'amer. Cette première loi de géo-référencement prend alors la forme suivante :

$$D_{ortho_{min},s}(i) = \frac{1}{\alpha_{d,s} \cdot i + \beta_{d,s}} \quad \text{- Équation 7}$$

Avec :

- i : l'indice de la parabole,
- $\alpha_{d,s}$ et $\beta_{d,s}$: le coefficient directeur et l'ordonnée à l'origine obtenu par régression linéaire entre l'indice de la parabole où est présent l'amer et l'inverse de sa distance $D_{ortho_{min}}$, pour la session s .
- La deuxième fonction permet de positionner un point d'une parabole de l'image GoPro® sur la droite de la carte de la baie en mettant en relation les distances entre les amers et le centre de visée de la caméra pour les deux images. Cette fonction est aussi issue d'une régression linéaire entre le ratio des deux distances et l'indice de la parabole. Cette deuxième loi de géoréférencement prend alors la forme suivante :

$$\rho_s(i) = \alpha_{\rho,s} \cdot i + \beta_{\rho,s} \quad \text{Où} \quad \rho(i) = \frac{Y_{GoPro}(i)}{D_{axe_{visée}}} \quad \text{- Équation 8}$$

Avec :

- i : l'indice de la parabole,
- $\alpha_{\rho,s}$ et $\beta_{\rho,s}$: le coefficient directeur et l'ordonnée à l'origine obtenus par régression linéaire entre l'indice de la parabole où est présent l'amer et l'inverse de sa distance $D_{ortho_{min}}$, pour la session s ,
- Y_{GoPro} : la distance du pixel sur l'image GoPro® par rapport au milieu de l'image,
- $D_{axe_{visée}}$: La distance du pixel sur la carte par rapport à l'axe de visée.

Durant la manipulation terrain, un roulement était organisé entre les deux caméras. Malgré la présence d'un marquage au sol permettant de placer les caméras à une position précise, la position des amers diffère en fonction des sessions. Afin de limiter les incertitudes de positionnement entre les différentes sessions, des fichiers de calibration renseignent les positions des amers et du centre de visée pour chacune des 45 sessions. Ainsi, les deux régressions linéaires de géoréférencement ont été réalisées pour chaque session d'étude. Les pourcentages de variance capturés par la régression linéaire R^2 obtenus sont supérieurs à 97,5 % pour l'ensemble des sessions.

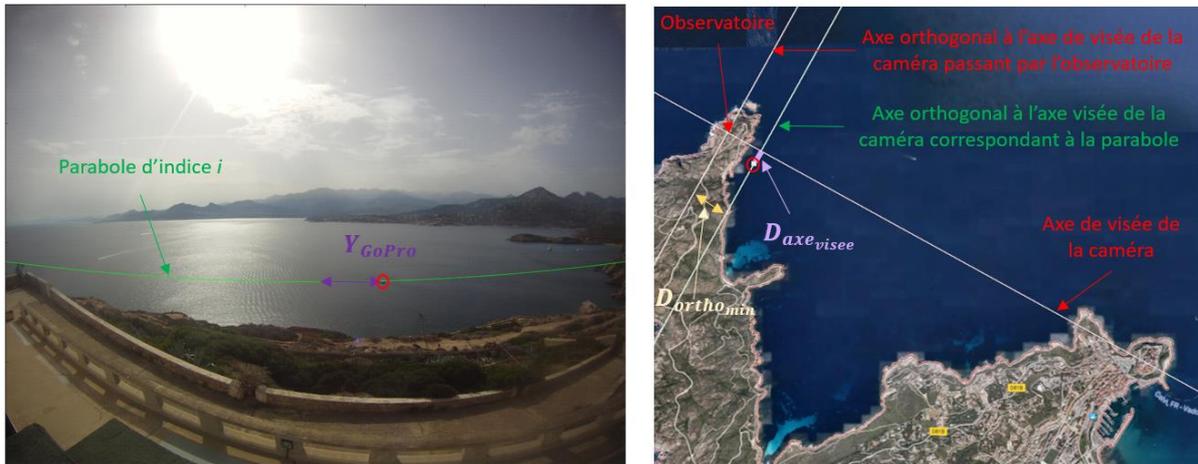


Figure 26 : Explication de la localisation et des variables pour les fonctions de géoréférencement

3.4.5 Etape 4 : la projection des détections sur la carte

La projection des pixels d'une image est réalisée en suivant, pour l'ensemble des pixels compris entre les paraboles passant par la citadelle et le phare de Stareso, les cinq étapes présentées dans la Figure 27. Dans un premier temps, la connaissance du point de prise de la photographie et du point de visée de la caméra permet d'estimer le coefficient directeur des droites correspondant à ces paraboles sur une carte de la zone d'étude. L'indice de parabole sur lequel est situé le pixel dans l'image GoPro® est déterminé en fonction des coordonnées du pixel. La connaissance de cet indice permet d'estimer la distance minimale sur la carte de la baie entre l'observatoire et la droite orthogonale à l'axe de visée passant par le point. La deuxième loi de géoréférencement permet de définir la distance du pixel par rapport à l'axe de visée en fonction de la distance du pixel sur l'image GoPro® par rapport au milieu de l'image et l'indice de la parabole. La formule permettant de relier un pixel de l'image GoPro® à une position sur la carte du Calvi est présentée en Annexe 1 : Traitement d'images GoPro®.

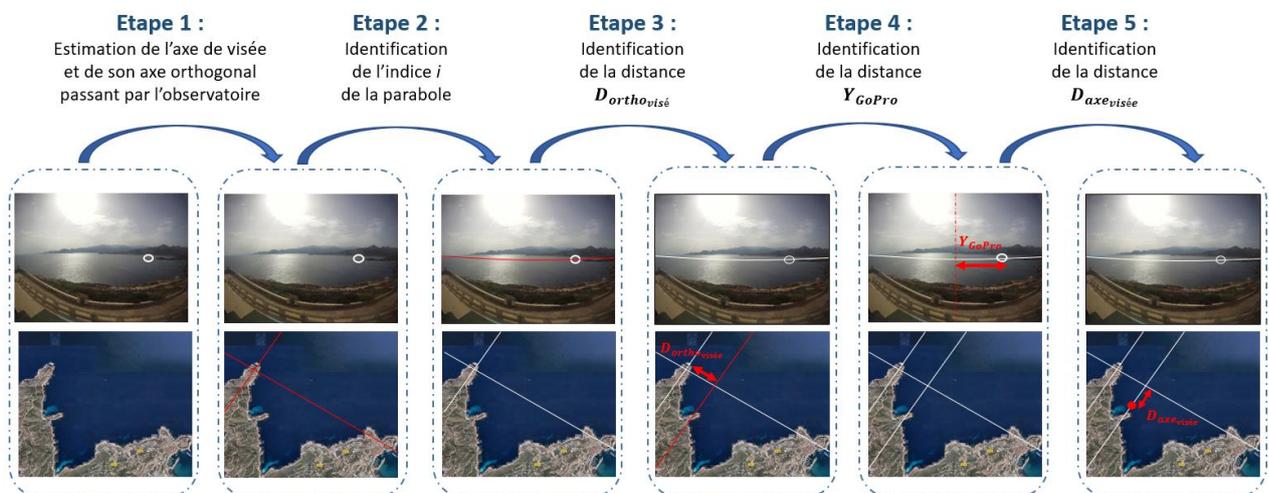


Figure 27 : Méthode de relocalisation des pixels de l'image sur la carte de la baie de Calvi

3.4.6 Le dénombrement du nombre de bateaux

Le dénombrement du nombre de bateaux dans la baie est réalisé par un algorithme permettant alors d'identifier le nombre de trajectoires rectilignes présentes dans la matrice cumulée. Cet algorithme utilise la transformée de Hough. Cette méthode est soumise à différentes contraintes :

- La durée d'analyse doit être supérieure à 1 minute pour pouvoir détecter une ligne droite et inférieure à 2 minutes pour ne pas confondre les trajectoires de plusieurs bateaux.
- Le dénombrement de deux bateaux navigant à proximité n'est pas réalisable.
- Les trajectoires circulaires ne sont pas détectées ou sont détectées en double. Ces trajectoires sont très présentes à proximité de la pointe de la Revellata.

3.5 Les performances de la méthode

3.5.1 Les limites de la détection par traitement d'images

D'un point de vue détection par traitement d'images, la principale limite contextuelle de cette méthode est l'effet du soleil. Pour les sessions les plus matinales, le soleil étant bas dans le ciel, il se reflète sur l'eau et crée une zone blanche sur l'image. La différence entre deux images étant nulle dans cette zone, il n'est alors pas possible de réaliser la moindre détection (Figure 28). Un nombre important de détections apparaît dans les mailles à la limite de cette zone. Ainsi pour la réalisation de la carte finale du trafic maritime, les sessions matinales n'ont pas été intégrées.

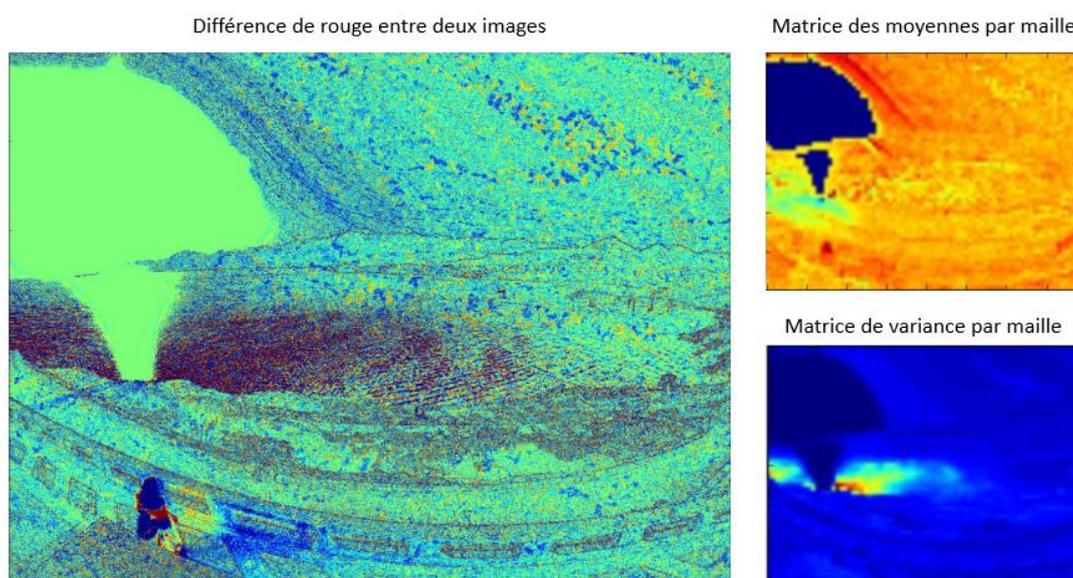


Figure 28 : Différence de rouge entre deux images consécutives pour une session matinale, ainsi que les matrices de moyenne et de variance par maille

Cette méthode permet de détecter les grandes embarcations quelles que soit leurs positions dans la baie. La limite de détection des petites embarcations dépend des conditions météorologiques : plus le temps est « laiteux », moins les images sont nettes pour de longues portées et plus cette distance de détection sera faible. Par temps clair, la limite de détection des embarcations de moins de 20m est estimée à 1,33 km pour la GoPro® A et de 1,65 km pour la GoPro® T.

La correspondance entre le nombre de pixels détectés et le nombre de bateaux n'est pas directe. Pour le passage du même bateau, un même pixel peut être détecté à plusieurs reprises. Par exemple lorsqu'un bateau est long et est à une vitesse faible, lorsqu'un bateau à une vitesse élevée ou lors du passage d'un groupe de jet-ski. Dans le second cas, le sillage du bateau est détecté : plus la vitesse du bateau est élevée, plus le sillage est persistant et plus le nombre de détections pour un même pixel

sera élevé. Généralement, ce nombre se limite à 4 pixels pour les bateaux les plus rapides. Les jet-skis sont présents majoritairement dans la baie par groupe de 4 à 5, traversent la baie en file indienne et à vitesse élevée. Ces facteurs provoquent un nombre important de détections d'un même pixel : entre 25 et 30 détections. Ainsi, le passage d'un « banc » de jet-ski provoque l'apparition d'une trace bien distincte sur les cartes de trafic.

3.5.2 Performance de relocalisation

3.5.2.1 Etude des performances de relocalisation

Une étude sur les performances de relocalisation est présentée en Annexe 1 : Traitement d'images GoPro®. Cette étude est organisée en 3 parties. La première section présente les incertitudes de positionnement dues à la résolution de la carte de Calvi. Couvrant une surface 14,7 km² pour une résolution de 981 par 1255, chaque pixel de cette carte correspond un rectangle de 3,47 m de côté à

	Distance $D_{ortho_{min}}$ à partir de laquelle :					Incertitude maximale	
	L'incertitude $D_{ortho_{min}}$ est < 3,47 m	L'incertitude $D_{ortho_{min}}$ est < 17,35 m	L'incertitude $D_{ortho_{min}}$ est < 30 m	La surface d'incertitude est < 12,04m ²	La surface d'incertitude est < 36m ²	L'incertitude $D_{ortho_{min}}$	La surface d'incertitude
GoPro® T	680 m	1510 m	1545 m	950 m	1414 m	144,4 m	358 m ²
GoPro® A	530m	1180m	1980 m	1270 m	1810 m	78,4 m	225 m ²

+/- 0,04 m. Cette résolution est adaptée pour la localisation de bateaux.

La deuxième section de cette étude présente alors les incertitudes de positionnement dues à la méthode et aux résolutions des caméras. Ce calcul est indépendant des incertitudes liées aux deux fonctions de repositionnement grâce à l'amer. Ainsi, cette étude permet d'estimer l'incertitude induite par une erreur de 1 sur l'indice de la parabole et de 1 pixel sur la distance Y_{GoPro} . La résolution de la caméra conditionne le nombre de pixels exploitables et par conséquent, crée une incertitude sur la relocalisation de chaque pixel. Ayant une meilleure résolution, les incertitudes de positionnement liées à $D_{ortho_{min}}$ sont plus faibles pour la GoPro® T. La distance minimale entre l'observatoire et la droite linéaire $D_{ortho_{min}}$ est inversement proportionnelle à l'indice de la parabole. Ainsi, l'espacement entre chaque ligne droite augmente lorsque l'on s'écarte de la position de l'observatoire, ainsi que l'incertitude sur $D_{ortho_{min}}$ et la surface d'incertitude globale (Table 6). La Figure 29 représente l'incertitude sur la distance $D_{axe_{visée}}$ en fonction de l'indice de la parabole (indirectement la distance $D_{ortho_{min}}$) et la distance Y_{GoPro} (correspondant à l'éloignement par rapport à l'axe de visée) : l'incertitude sur $D_{axe_{visée}}$ augmente lorsque ces deux paramètres augmentent. Les écarts induits par les variations de l'indice de la parabole sont plus déterminants que les écarts observés pour la variation de Y_{GoPro} . L'influence de Y_{GoPro} augmente lorsque l'indice de la parabole augmente. Contrairement au cas précédent, les incertitudes sont plus marquées pour la caméra de meilleure résolution.

Table 6 : Incertitudes sur la distance $D_{ortho_{min}}$ et la surface d'incertitude globale, pour les deux GoPro® : incertitude maximale et distance à partir de laquelle l'incertitude dépasse une valeur fixée

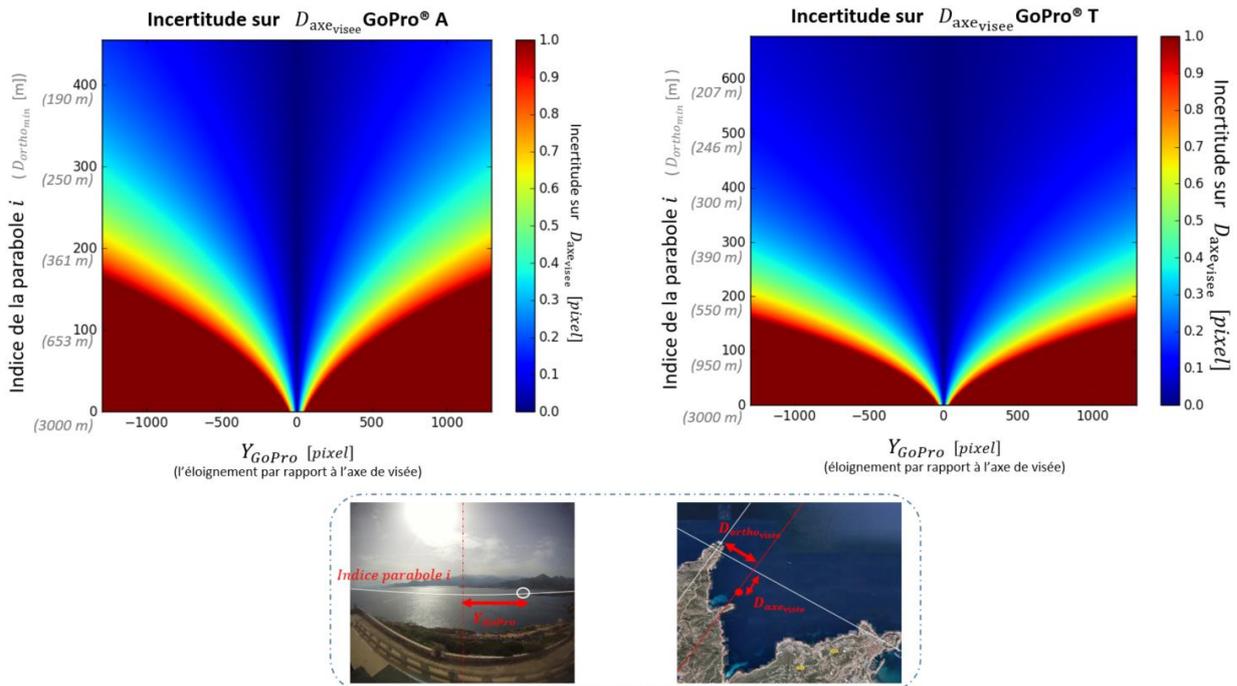


Figure 29 : Incertitude sur le positionnement sur l'axe orthogonal, pour la GoPro® A (à gauche) et pour la GoPro® T (à droite) avec application d'un seuil de 1 pixel (3,47 m)

La troisième section de cette étude se focalise sur l'estimation des écarts de localisation pour 8 trajets dont les coordonnées réelles ont été acquises à l'aide d'un récepteur GPS placé dans l'un des bateaux de Stareso. La Figure 30 présente les différentes traces GPS enregistrées et la Figure 31 présente l'écart observé entre ces deux traces. Les étoiles rouges correspondent aux amers. L'écart de localisation semble lié à plusieurs paramètres : l'angle par rapport à l'axe de visée, l'intersection avec cet axe, les distances $D_{ortho_{min}}$ et $D_{axe_{visée}}$. L'écart entre les traces est plus marqué pour :

- Les distances $D_{ortho_{min}}$ faibles (inférieures à 1000 m), à cause d'une courbure plus prononcée des trajectoires lors de l'analyse par traitement d'images. Les différences observées sur trois trajets (les deux allant à la Citadelle et le trajet jaune allant au centre de la baie) atteignent alors une différence maximale de 40 et 80 m à une distance $D_{ortho_{min}}$ comprise entre 420 m et 520 m, et devient alors inférieure à 10 m pour une distance $D_{ortho_{min}}$ supérieure à 750 m.
- Les trajectoires formant un angle élevé avec l'axe de visée. La distance $D_{ortho_{min}}$ accroît cet effet. Pour 2 trajets allant à la pointe de la Revellata (rose et bleu) et formant un angle de 90° avec l'axe de visée, les différences observées sont de 34 m et 52 m à une distance $D_{ortho_{min}}$ de 320 m et 436 m, soit 10,6 % et 11,9 % de la distance $D_{ortho_{min}}$. À l'inverse, malgré la forte distance à l'observatoire, l'écart entre les traces GPS et les traces issues de l'analyse par caméra est très faible pour le trajet allant au plus proche de la Citadelle.
- Lorsque l'on s'écarte de l'axe de visée. Pour le trajet allant au plus proche de la Citadelle, dans la portion du trajet à angle constant, l'écart de localisation augmente linéairement quand $D_{axe_{visée}}$ augmente et atteint un maximum de 17 % de la valeur d'éloignement par rapport à l'axe de visée, soit 30 m sur 176 m, pour une variation sur 500 m sur l'axe de visée.

L'écart de localisation est maximal pour les trajets ayant un angle élevé par rapport à l'axe de visée. En considérant les portions formant un angle de plus de 80° avec l'axe de la visée (les trajets rose, bleu et la fin du trajet rouge), cet écart est estimé en fonction de la distance $D_{ortho_{min}}$ par régression linéaire,

avec un pourcentage de variance R^2 de 97,7% : $\varepsilon_{loc} = 0,17 \cdot D_{ortho,min} - 31,1$ (Équation 9). La Table 7 résume alors différentes caractéristiques sur cette erreur de localisation.

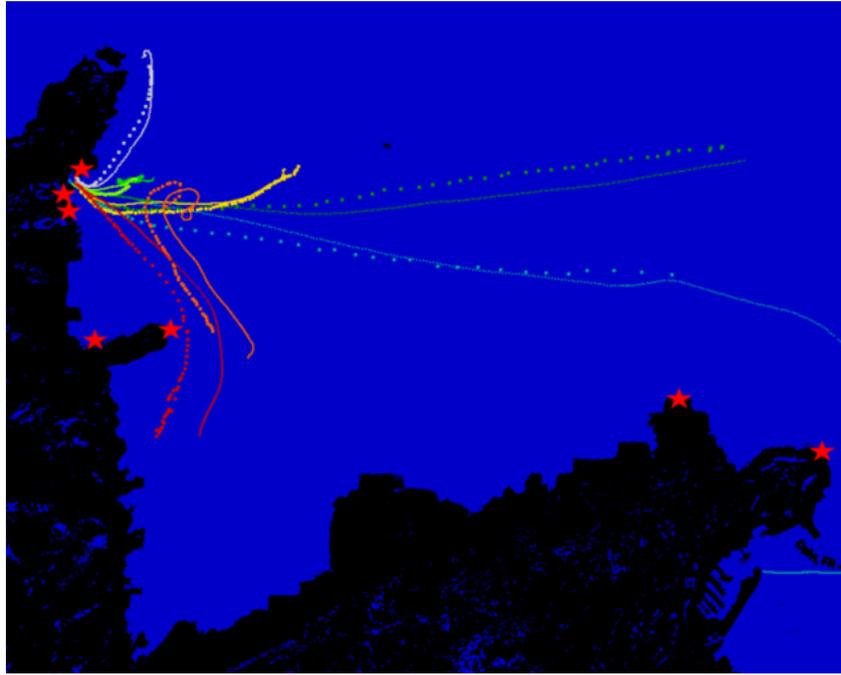


Figure 30 : Carte de la baie de Calvi avec en trait plein les positions GPS des 8 parcours considérés et en pointillés la relocalisation du bateau effectuée en utilisant les fonctions de repositionnement.

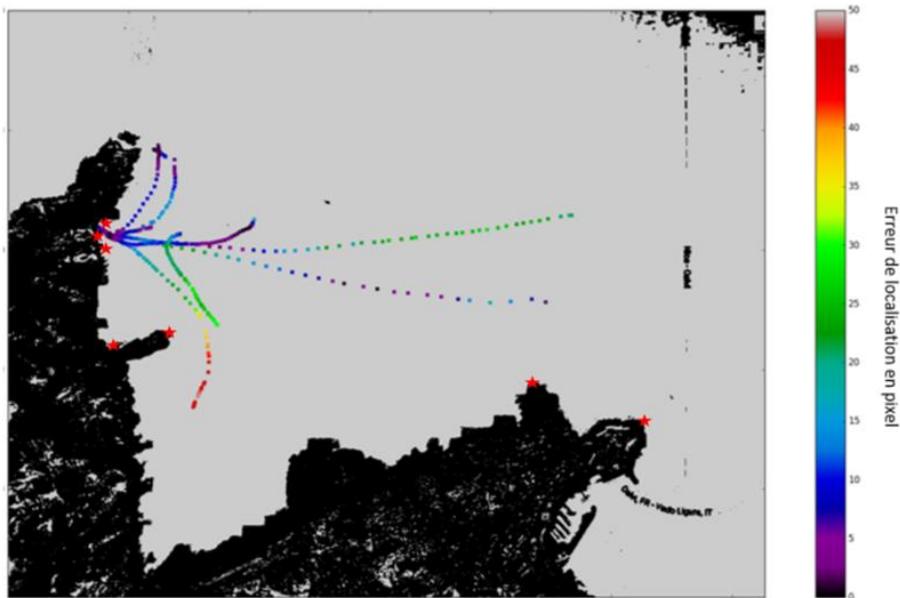


Figure 31 : Ecart de positionnement entre les coordonnées GPS et la relocalisation depuis les images des caméras – Sur cette carte, la terre est représentée en noir, la mer est représentée en gris et l'écart de localisation est représenté en échelle de couleur allant du noir au rouge.

Distance $D_{ortho,min}$	300m	475 m	1500m	3000m
Ecart de localisation (ε_{loc}) inférieur à :	20 m	50 m	230 m	480 m
Pourcentage de ε_{loc} par rapport à $D_{ortho,min}$	6,5 %	10,5 %	15 %	16%

Table 7 : Ecart de localisation : Distance $D_{ortho,min}$ à partir de laquelle l'écart de localisation est inférieur à u seuil fixe, et pourcentage que représente l'incertitude par rapport à la distance $D_{ortho,min}$

La comparaison avec les résultats théoriques montre que les écarts de localisation identifiés lors de la comparaison de traces GPS aux traces issues de la relocalisation par traitement d'images ne peuvent exclusivement être associés à la méthode mise en place ou à la résolution des caméras. Une première partie des écarts de localisation est due à l'inclinaison des caméras. Des faibles rotations d'images ont été détectées entre les différentes sessions. Ces rotations provoquent alors des écarts lors de l'estimation de la parabole liée à la déformation. En l'absence de ligne réelle droite et horizontale, ces déformations n'ont pu être estimées directement sur les images de la baie. A ces écarts s'ajoutent les variations dues à la réalisation empirique des fonctions de géoréférencement. L'augmentation du rayon de courbure des trajectoires est liée à la fonction de géoréférencement reliant le rapport des distances $D_{\text{axevisée}}$ et Y_{GoPro} à l'indice de la parabole. Ces écarts sont présents pour l'ensemble des distances, mais plus marqués lorsque cette distance est faible. Les écarts de localisation lorsque le bateau forme un angle droit avec l'axe de visée sont directement liés à la fonction de géoréférencement reliant la distance $D_{\text{ortho}_{\min}}$ à l'indice de la parabole.

Les écarts de localisation sont plus marqués lorsque le bateau parcourt la baie perpendiculairement à l'axe de visée. Ces écarts de localisation sont faibles au regard de la longueur des bateaux. Pour de grandes portées, ces écarts de localisation restent inférieurs à 16 % de la distance avec l'observatoire. Cette direction concerne alors les bateaux parcourant le rail « *Revellata - Oscelluccia* » et les bateaux quittant les plages de l'Alga et de l'Oscelluccia pour se rendre vers le large. Dans le cas présent, la majorité des bateaux empruntent le rail « *Revellata-Citadelle* ». Ce rail forme alors un angle faible avec l'axe de visée de la caméra et reste proche de cet axe. Ainsi, lors d'une analyse long terme de la baie et la réalisation de la carte du trafic maritime, les écarts de localisation peuvent être compensés par la forme de la trajectoire. Ces écarts n'en demeurent pas moins présents.

Pour limiter les incertitudes sur le choix des pixels de la carte de la baie, les fonctions de géoréférencement peuvent être réalisées en considérant directement les coordonnées GPS de chaque amer. Pour diminuer l'écart de localisation, les fonctions de géolocalisation doivent intégrer un nombre plus conséquent d'amers, positionnés aussi bien sur terre que sur le plan d'eau. En effet, la majorité des amers sont présents à l'extrémité de l'image, où les déformations sont les plus conséquentes. Le passage d'un bateau équipé d'un récepteur GPS et parcourant la baie est donc nécessaire pour réaliser cette calibration. Il est à noter que le positionnement des amers sur l'eau peut être utilisé uniquement pour les acquisitions où la caméra n'a subi aucun déplacement : la caméra doit parfaitement horizontale et ne pas subir de déplacement durant l'intégralité des enregistrements. Dans le cas présent, les traces GPS ayant été acquises à différentes sessions de photographies, l'intégration des coordonnées du bateau comme amers ne peut être réalisée, hormis pour les deux trajets allant vers la baie de l'Alga présent sur la (Figure 32). En utilisant l'ensemble des coordonnées GPS du trajet 1 comme amers, la localisation des deux trajets est **considérablement améliorée** : les écarts maximaux de localisation de chutent de 104 m à 52 m pour le trajet utile pour la calibration, et de 163 à 83 m pour le deuxième trajet.

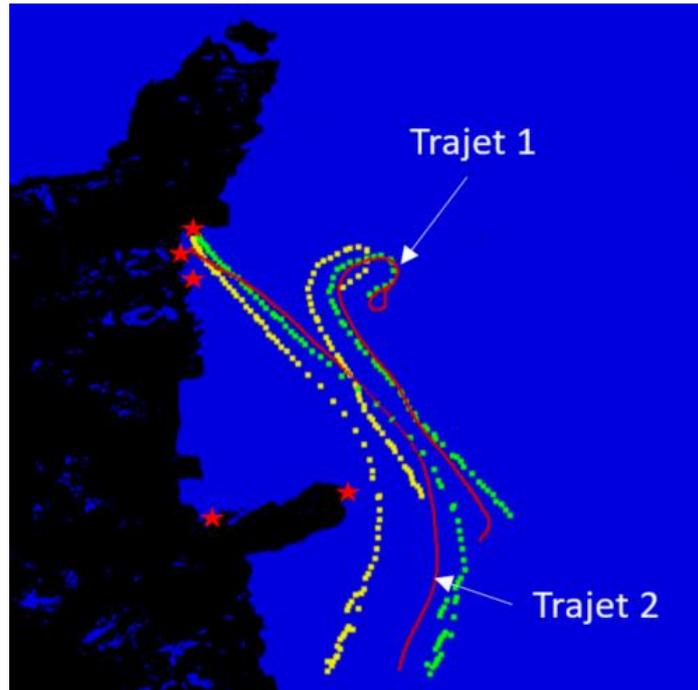


Figure 32 : Relocalisation des tracés allant vers l'Alga en ajoutant les coordonnées GPS comme amers. Les traces rouges correspondent aux données GPS, les traces jaunes correspondent au positionnement en utilisant les amers classiques et les traces vertes correspondent à la localisation en utilisant les amers classiques ainsi que l'ensemble des coordonnées GPS du trajet 1 comme amer. Les étoiles rouges correspondent aux amers visibles sur cette portion de carte.

3.5.2.2 Influence des performances de localisation sur l'estimation des niveaux acoustiques

L'incertitude de localisation présentée dans la partie précédente traite de l'incertitude de localisation en fonction de $D_{ortho_{min}}$. En considérant la hauteur d'eau et le fait que le bateau ne se déplace pas sur l'axe de visée de la caméra, l'incertitude maximale sur la distance entre un bateau et l'enregistreur est alors estimée par la formule :

$$\Delta D = \sqrt{H^2 + D_{horz}^2 \cdot \left(\frac{D_{ortho_{min}}}{D_{ortho_{min}} - \epsilon_{loc}} \right)^2} - \sqrt{H^2 + D_{horz}^2} \quad \text{- Équation 10}$$

Le terme $\frac{D_{ortho_{min}}}{D_{ortho_{min}} - \epsilon_{loc}}$ atteint une asymptote de 1,2. Les valeurs présentes dans la Table 8 correspondent à une **majoration** de l'incertitude de la distance entre l'enregistreur et le bateau obtenue en remplaçant ce terme par sa valeur asymptotique.

Les pertes de propagation sont la combinaison des deux termes : les pertes géométriques et les pertes par absorption moléculaire (1.1 p10). Les pertes par absorption moléculaire sont proportionnelles à la distance exprimée en km, les incertitudes de localisation sont négligeables sur ce terme. [Lossent_2017] a montré que le coefficient caractérisant les pertes géométriques est de 15. La différence de perte de propagation, estimé avec **majoration** de l'incertitude de la distance, prend une valeur asymptotique de 1.2 dB. 99% de cette valeur est atteinte à partir d'une distance de 48 m.

Distance mesurée	50 m	100 m	200 m	300 m	500 m	800 m
Incertitude sur la distance entre l'enregistreur - bateau	8.7 m	19.2 m	40.1 m	59.6 m	100.4 m	159.9 m
Incertitude sur l'estimation des pertes de propagation	1.19 dB	1.19 dB	1.2 dB	1.2 dB	1.2 dB	1.2 dB

Table 8 : Incertitude sur la distance bateau-enregistreur et sur l'estimation des pertes de propagation en fonction de la distance mesurée

Les incertitudes sur l'estimation des niveaux sources ne sont pas déterminantes au regard des incertitudes présentes sur la chaîne d'acquisition, plus précisément la marge d'erreur de calibration des hydrophones estimées à 3 dB dans la littérature.

3.5.3 Performance globale de la méthode et zone d'exclusion

La visualisation de la carte finale du trafic maritime montre que les détections deviennent moins précises pour une distance de 1,6 km. Représentant alors une superficie de 3,48 km², cette portion de disque représente alors 58 % de la baie. (Figure 33)

Des zones d'exclusion apparaissent et correspondent aux zones faisant partie du champ de vision où aucune détection n'est réalisée et représente 5.86% de la baie, soit 0.354 km². Deux types de zones d'exclusion sont observables :

- Les zones d'exclusions correspondant aux zones masquées par le relief : la zone devant la plage de l'Alga masquée par la presqu'île de la Revellata (0,287 km² soit 4,8 % de la baie) et des zones devant la plage de l'Oscelluccia (0,01 km² soit 0,16 % de la baie).
- Une zone d'exclusion due au dénivelé du site et à la méthode de géolocalisation : la bande longeant la pointe de la Revellata (0,057 km² soit 0,9 % de la baie avec une distance à la côte est comprise entre 70m et 90 m). Depuis l'observatoire, il n'est pas possible de voir la côte quel que soit l'angle de visée de la caméra : entre l'observatoire de vérité terrain et les rochers affleurant l'eau une pente moyenne de 42 % est observée avec une partie fortement abrupte (pente de 114 %). De plus, la limite de cette zone est fixée par les fonctions de géolocalisation. Les fonctions de géolocalisation sont bornées par les positions des amers extrêmes, dans ce cas, par l'extrémité du phare de Stareso.

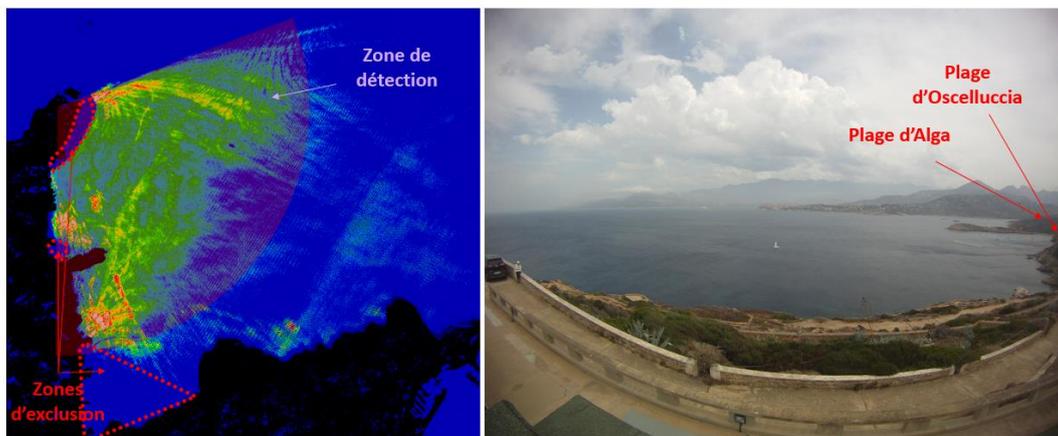


Figure 33 : Zone de détection et zones d'exclusions du traitement par images

3.6 Analyse du trafic maritime de la baie

La méthode présentée permet de réaliser des cartes du trafic maritime correspondant alors au nombre de détections par zone de 12 m² par heure : Figure 35, Figure 36 et Figure 37. La zone de 12m² correspondant à 1 pixel sur la carte de la baie. Ces cartes peuvent être réalisées en considérant plusieurs échelles de temps : l'heure, la journée et la semaine. Pour permettre la comparaison entre les différentes cartes de même échelle temporelle, le nombre de détections par pixel est divisé par la durée de surveillance en heures pour construire chaque carte et une unique échelle de couleur est

utilisée pour chaque échelle temporelle. Sur ces cartes, la terre est représentée en noir, l'espace maritime non surveillé est représenté en bleu et le nombre de détections par pixel dans l'espace maritime surveillé est représenté en couleur allant du vert au rouge. Plus la couleur est chaude, plus le nombre de détections est important.

3.6.1 Analyse intra-jour : un trafic maritime rythmé par les plaisanciers

L'annotation manuelle de la baie a été réalisée sur l'ensemble de la baie (6 km²), alors que l'identification GoPro permet une observation correcte pour une zone réduite présentant 58% de cette zone. Durant la session de Juillet 2016, 2855 passages de bateaux ont été annotés pour 64 heures de surveillance de la baie, représentant des moyennes théoriques de 44,6 passages de bateaux par heure et de 7,4 passages de bateaux toutes les 10 minutes.

Une différence du nombre de bateaux est notée entre les jours de la semaine et le weekend. Toutefois, cette différence ne relève pas des propriétés hebdomadaires du trafic maritime mais d'événements météorologiques. En effet, les journées du samedi et du dimanche ont été marquées par de forts coups de vents et des risques d'orage. Le trafic annoté durant ces deux journées a été alors plus faible, d'environ un tiers que le nombre de bateaux observés durant la semaine.

L'analyse des cartes manuscrites de vérité terrain réalisées en temps réel lors des expérimentations permet de visualiser l'état du trafic maritime toutes les 10 minutes. Le calage de ces cartes est effectué sur la minute 0 de chaque dizaine de minutes entre 8h et 19h. La Table 9 présente les statistiques obtenues en considérant plusieurs échelles temporelles. La valeur moyenne théorique de 7,4 passages toutes les 10 minutes est dépassée durant 45,6 % des sessions de 10 minutes. De même la valeur moyenne théorique de 45,6 traversées par heures est dépassée par 51 % des sessions de 1 heure.

Nombre de bateaux présent durant	10 ^{ème} centile	25 ^{ème} centile	50 ^{ème} centile	75 ^{ème} centile	90 ^{ème} centile	max	moyenne	Ecart type
10 minutes	3	5	7	10	12	19	7.6	3.6
1 heure	25	36	45	56	68	73	45.6	14.6
1 journée	307	340	380	435	499	549	396.9	80.8

Table 9 : Statistique sur le nombre de bateaux pour différentes durées d'observation

Ce nombre de bateaux traversant cette baie évolue en fonction des périodes de la journée au rythme des plaisanciers. Avant 9 heures, peu de bateaux naviguent sur la baie de Calvi (3,8 traversées en moyenne toutes les 10 minutes). Ce nombre est inférieur à 7 traversées pour l'ensemble des sessions et correspond à un nombre moyen de 20 traversées durant l'ensemble de l'heure. Dès 9 heures, ce trafic s'intensifie brusquement avec l'arrivée des premiers zodiacs amenant les plongeurs à la pointe de la Revellata. De 9h à 12h, le nombre de bateaux présents dans la baie, par session de 10 minutes oscille entre les valeurs moyennes de 6 et de 8 traversées. Plusieurs maximums locaux de 9 à 10 bateaux sont alors atteints pour les sessions de 9h10, 10h40 et 11h40. Le nombre de traversées atteint son apogée entre 12h et 12h30 avec un nombre moyen supérieur à 9,7 bateaux pour ces trois sessions consécutives. Le suivi du trafic de la baie à l'échelle de l'heure montre que le nombre de traversées semble être le même entre 9h à 10h et 10h à 11h, avec 47 traversées par heures, et augmente de 11h à 12h à 50 traversées par heure. Ce trafic diminue fortement à l'heure du repas : de 3 à 6 bateaux sont comptés en moyenne durant les sessions de 13h40 à 14h20. Le trafic de la baie augmente à nouveau après 14h30. Cette augmentation progressive du nombre de bateaux traversant la baie atteint un maximum entre 16h50 et 17 h où en moyenne, 11,7 bateaux ont été annotés. Cette session correspond aussi à la plus forte valeur médiane observée : 12,5 traversées. Le nombre de bateaux présents dans la baie diminue alors progressivement jusqu'à 19h. La Figure 34 représente l'évolution du nombre de bateaux traversant la baie par session de 10 minutes pour les 8 jours d'analyses. Chaque tranche de 10 minutes représente les statistiques obtenues lorsque la tranche a été surveillée durant au minimum 4 jours.

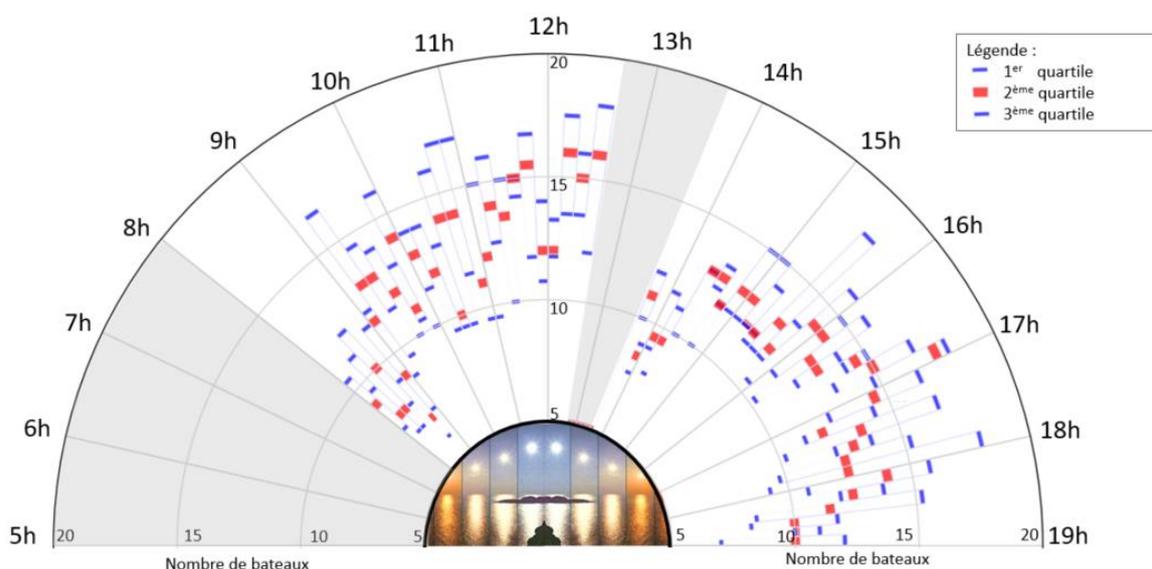


Figure 34 : Valeur statistique des trois quartiles du nombre de bateaux traversant la baie de Calvi par session de 10 minutes

L'analyse des cartes du trafic maritime confirme l'analyse observée lors de l'étude des cartes manuscrites. La Figure 35 représente les cartes du trafic maritime par heure dans la baie. L'échelle de couleur est fixée entre 0 et 2,5 détections par pixel et par heure. Le nombre maximal de détections par pixel et par heure est toutefois compris entre 6 et 32 et est uniquement dû aux différents éléments limitant de la méthode de détection. L'effet du soleil est fortement marqué pour les cartes de 8 à 9h

et de 9 à 10h. Cet effet néfaste crée un masquage du rail « Revellata-Citadelle » et augmente le nombre de détections à la plage de l'Alga de 18h à 19h. Les zones concernées sont entourées en noir. Ainsi, les valeurs du 75^{ème} percentile de la distribution du nombre de détections par pixel sont plus importantes pour ces sessions (0,84) que pour les autres sessions où le trafic maritime est pourtant plus dense (0,59). Les différentes traces bien marquées sont dues au passage d'un groupe de jets-skis. C'est le cas de la trace sur la carte du trafic maritime de 11h à 12h quittant la baie de l'Alga, entourée en rose, qui est due au passage de 5 jets skis en file indienne. De par le faible nombre de pixels concernés, cette augmentation locale du nombre de pixels a une faible influence sur la distribution globale du nombre de détections par pixel.

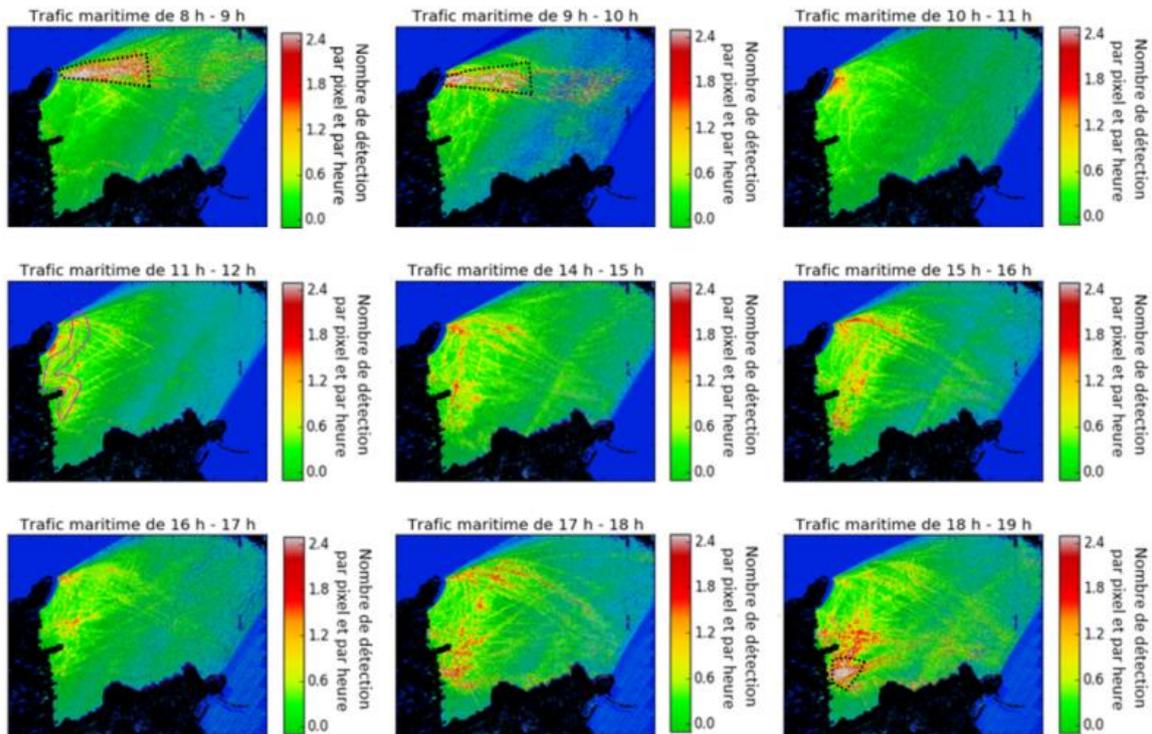


Figure 35 : Carte du trafic maritime par heure : nombre de détections par zone de 12 m² et par heure

L'analyse de ces cartes du trafic maritime permet d'identifier la fréquentation d'une route en fonction des horaires de la journée. Les cartes de 10 à 12h montrent que le trafic est homogène sur l'ensemble des routes, avec une légère tendance haussière pour la route « Revellata-Citadelle » de 11h à 12h. De 14h à 16h, les bateaux quittent la baie et empruntent principalement la route « Revellata-Citadelle », puis la route « Revellata-Alga ». A partir de 17h, les bateaux rentrent vers leurs zones de mouillage. De 17h à 18h, les bateaux contournent principalement la Revellata pour se rendre à la Citadelle et à la baie de l'Alga. De 18h à 19h, les bateaux quittent majoritairement la baie d'Alga et de l'Oscelluccia pour se rendre au port de la Citadelle.

Des informations sur la densité du trafic peuvent être aussi extraites de ces cartes et confirme l'annotation manuscrite. Le trafic maritime diminue durant la matinée (diminution du pourcentage de pixel sans détection) et s'homogénéise sur l'ensemble de la baie (augmentation de la valeur médiane). Ce trafic maritime est plus important durant les sessions de l'après-midi que durant les sessions de la matinée : l'après-midi, le pourcentage de pixels sans détection est alors plus faible et la valeur moyenne de la distribution est plus importante. Une augmentation de l'activité est à noter pour la session de 16h à 17h, traduit par une forte diminution du nombre de pixel sans détection. Ce trafic étant localisée, la valeur médiane observée est plus faible pour les autres sessions de l'après-midi.

Session	Matinée		Après midi	
	8h -9h	11h - 12h	14h-15h/15h-16h /17-18h	16h-17h
Pourcentage de pixels sans détection	34,89 %	15,89 %	17,7 % à 19,3 %	28,3 %
Valeur médiane de détections / pixel / heure	0,19	0,35	0,29 à 0,42	0,19

Table 10 : Pourcentage de pixel sans détection et valeur médiane de détection par pixel par heure pour différente session.

3.6.2 Analyse du trafic à l'échelle journalière

La Figure 36 présente les cartes du trafic maritime de la baie pour chaque journée de surveillance. Bien qu'un nombre maximum entre 9 et 28 détections par pixel soit localement observé au niveau des zones d'encrage ou lors de passage de groupe de jet-ski, l'échelle de couleur est fixée entre 0 et 4 détections par pixel et par heure. Ces cartes ont été réalisées en considérant les détections à partir de 11h afin d'éviter l'effet du soleil. La durée de surveillance est alors identique pour toutes les journées sauf le 24 Juillet : suite aux conditions météorologiques trop contraignantes, la surveillance n'a été réalisée que le matin pour la journée du 24.

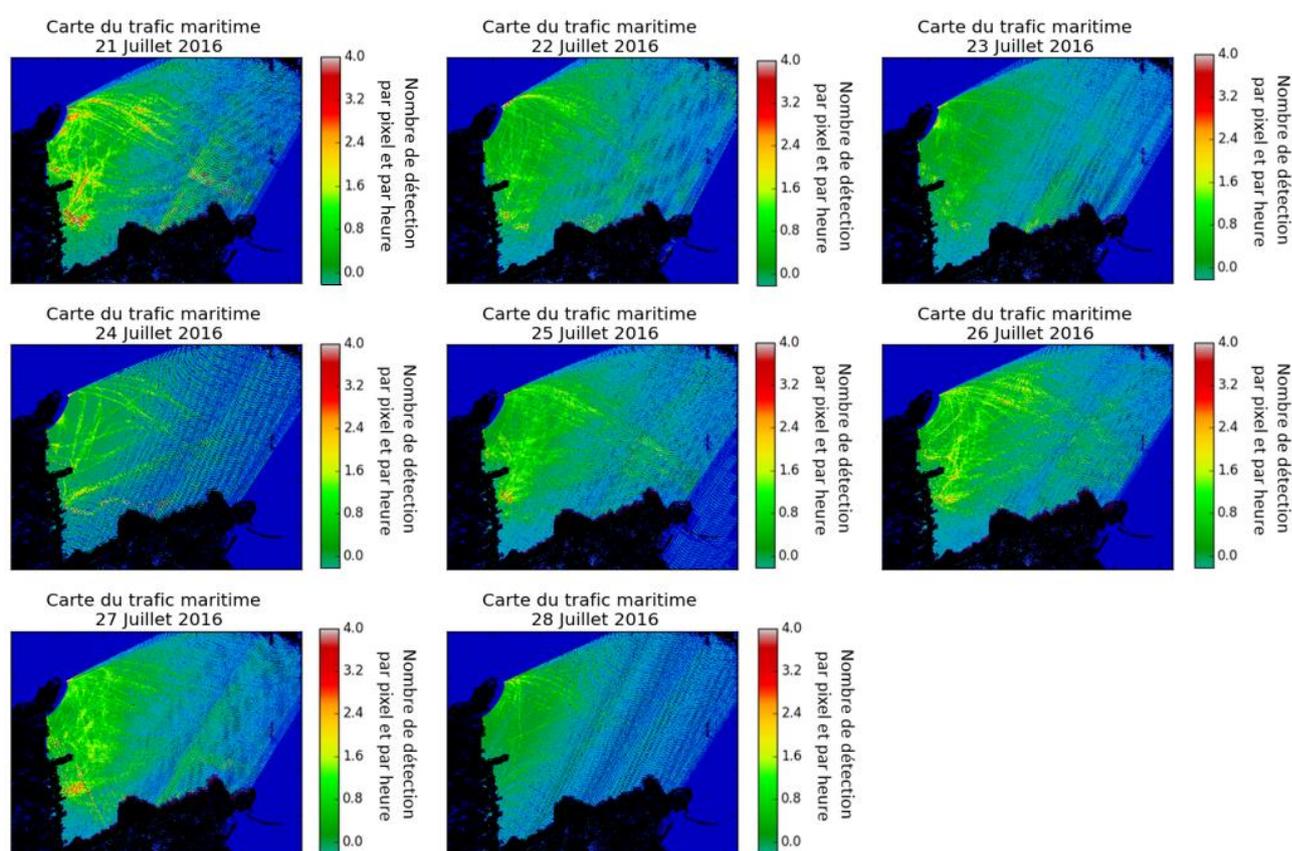


Figure 36 : Carte du trafic maritime par jours : nombre de détections par zone de 12 m² et par heure

La répartition du trafic maritime à travers la baie est globalement homogène entre les différentes journées. Pour les jours à même durée de surveillance, le nombre de pixels où aucune détection n'est réalisée est compris entre 12,6 % et 22,0%. Un maximum de 25,5 % durant la journée du 23 Juillet, lorsque les conditions météorologiques sont défavorables. La diminution du 90^{ème} percentile de détection par pixel (0.72 au lieu de 1.3 en moyenne pour les jours favorables) montre une diminution de la fréquentation de la baie. Cette influence des conditions météorologiques est remarquable lors de l'analyse de la carte du 24 Juillet : le nombre de pixels où aucune détection n'est réalisée est conséquent 70% contre 33 % à 58% durant les journées favorables à durée d'observation d'égale.

3.6.3 Analyse du trafic sur l'ensemble de la semaine

La Figure 37 présente la carte du trafic maritime de la baie réalisée en considérant l'ensemble des cartes de détection à partir de 11h afin d'éviter l'effet du soleil. Cette carte résume alors 43 heures de surveillance. L'échelle de couleur est fixée entre 0 et 2,2 détections par pixel et par heure. Le nombre maximal de détections par pixel et par heure est de 4,6 à l'approche de la pointe de la Revellata et de 5,6 au mouillage.

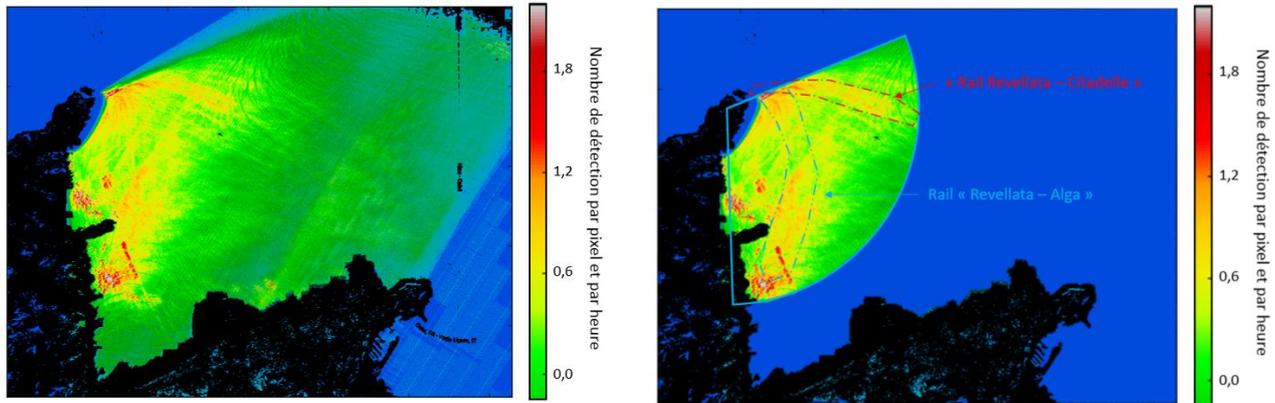


Figure 37 : Carte du trafic maritime de l'ensemble de la session pour l'ensemble de la baie (à gauche) et pour la zone de détection avec marquage des rails « Revellata-Citadelle » et « Revellata-Alga » (à droite)

Cette méthode de traitement d'images permet de localiser les zones de mouillages. Ces zones correspondent alors au nuage de points de fortes détections présent devant les plages de l'Oscelluccia et de l'Alga. En appliquant un seuillage sur cette carte, une carte des emplacements des mouillages est extraite de ces données.

Cette sommation des cartes du trafic maritime sur une semaine permet d'effectuer un lissage des traces individuelles de chaque bateau et permet d'identifier les zones, sous forme de rails étalés, à plus forte fréquentation. Deux rails de trafic maritime ressortent sur cette carte : le rail « Revellata-Citadelle » et « Revellata-Alga ». L'analyse par traitement d'images permet de confirmer que la pointe de la Revellata est le pôle le plus attractif de la baie : 41,3 % des pixels de plus de 0,5 détections par pixel et par heure et 30,0% des pixels de plus de 1 détection par pixel et par heure sont présents à proximité de la pointe de la Revellata. Parallèlement, l'analyse des cartes manuscrites du trafic maritime montre le fait que la pointe de la Revellata est un pôle attractif de la baie : 1181 passages de bateaux ont été annotés à proximité de ce pôle, soit 40.89% du trafic maritime de la baie.

La fréquentation des 3 routes partant de l'Oscelluccia est moins importante. En effet, aucune location de bateau n'est possible à cette plage et le nombre de mouillages étant moins important que pour la plage de l'Alga, cette plage est moins privilégiée par les plaisanciers. Etant dans la limite de détection, les rails partant de la Citadelle sont plus difficilement visibles : le rail « Revellata-Citadelle » est identifiable à partir de 800 m de la pointe de la Revellata, alors que le rail « Alga-Citadelle » ne peut être visualisé. Toutefois, le départ de certaines traces de bateaux depuis la plage de l'Alga et se dirigeant vers la droite de l'image permet de présumer sa présence.

L'analyse de la distribution du nombre de détections par pixel et par heure montre que sur l'échelle de la semaine, le trafic maritime présent dans la baie ne peut exclusivement être modélisé en considérant des rails maritimes. En effet, pour l'ensemble des sessions dans de la zone de détection dans un rayon de 1,6 km autour de l'observatoire, le pourcentage de pixels où aucune détection n'est réalisée est de 5,4 % : durant une semaine, au moins un bateau a parcouru chaque portion de 12m² de cette zone. Les rails de trafic maritime étant larges et leur fréquentation variant en fonction de l'heure de la journée, la présence de ces rails ne provoque pas de forte augmentation locale du nombre de

détections par pixel : 2,1 % de ces portions ont en moyenne un nombre de détection supérieure à 1 détection par pixel et par heure et seulement 0,02 % ont en moyenne un nombre de détection supérieure à 2 détections par pixel et par heure. Ainsi, la distribution du nombre de détections par pixel prend la forme d'une distribution bimodale, avec un mode, de moyenne 0,043 détections par pixel et par heure correspondant aux faibles détections au-delà de la limite de détection et un mode, de moyenne 0,39 détections par pixel et par heure correspondant à la détection dans un rayon de 1,6 km autour de l'observatoire. Aucun mode correspondant à la présence de rails n'est alors visible.

3.6.4 Un trafic maritime constant entre les sessions de 2015 et 2016

Les deux sessions du protocole de vérité terrain sont composées de journées propices à l'activité de plaisance et de journées avec des conditions climatiques non favorables (orage, fort vent). Le nombre moyen de passages de bateaux par journée est du même ordre de grandeur pour ces deux sessions, avec un nombre légèrement plus important durant la session de 2015. Pour la même plage horaire de suivi de la baie, 520 à 550 passages de bateaux ont été annotés durant les journées à conditions climatiques favorables de la session de 2015, contre 450 à 550 passages de bateaux annotés durant les journées favorables de la session de 2016. Lors des journées à conditions climatiques défavorables, ce nombre se voit réduit à 280 à 355 passages de bateaux par jour. Cette comparaison du nombre de passages de bateaux annotés entre la session de 2015 et la session 2016 montre que cette flottille semble être constante en fonction des années.

3.7 Discussion

[Flynn_2014], [Ezequiel_2014] et [Casella_2017] utilisent une caméra fixée sur un drone aérien pour réaliser une cartographie de site. La caméra est parallèle au sol et les images sont géoréférencées en utilisant un récepteur GPS. Cette méthode permet alors de s'affranchir des corrections dues à l'inclinaison de la caméra, et lorsque l'altitude du drone est faible, de la relocalisation de chaque pixel de l'image. Imaginons que l'on souhaite utiliser cette méthode pour la création de carte du trafic maritime. En considérant un drone volant à une altitude de 100 m et équipé d'une caméra ayant un angle d'ouverture de 120°, le système permet de visualiser un disque de 0,094 km². Ainsi, 37 drones sont nécessaires, au minimum, pour conserver la même surface de surveillance de la baie (3,48 km²).

[Bunin_2008] et [Sutin_2010] présentent une méthode permettant la localisation et la trajectographie de bateaux à l'aide de caméras non soumises à des déformations dans un objectif seul d'exploiter l'information de distance et non de créer des cartes du trafic maritime. Les travaux présentés sont donc les premiers travaux montrant la possibilité de réaliser une carte du trafic maritime, dans un environnement côtier et sans utiliser de données AIS, à l'aide d'une caméra sujette aux déformations grand-angle, et pour une prise de vue non parallèle au sol.

Notre méthode permet alors de détecter et localiser les bateaux traversant la baie jusqu'à une distance de 1,6 km de la pointe de la Revellata. La surveillance de l'ensemble de la baie pourra alors être envisagée en positionnant 2 caméras supplémentaires : une caméra située au plus haut possible sur la pointe de la Citadelle et une caméra située sur le parking surplombant la plage de l'Alga. De plus, pour s'affranchir des déformations grand-angle des GoPro®, la surveillance de la baie peut être réalisée par deux caméras sans déformation, positionnées au même endroit, mais observant la baie sous un angle différent. Cette méthode de cartographie et de surveillance du trafic maritime côtier peut alors être appliquée à un ensemble de zones plus étendues, sans installation de matériel. En effet, de nombreux sites côtiers possèdent déjà des caméras de type webcam, GoPro® ou autres, dont les photographies réalisées sont accessibles librement par internet. Il est à noter que les performances de localisation sont toutefois liées à l'altitude de la caméra. Pour s'affranchir de ce paramètre, il est possible d'envisager la surveillance de la baie depuis un drone aérien en vol stationnaire. D'un point de vue algorithmique, l'utilisation de ce support nécessite alors la mise en place d'un algorithme de

reconnaissance par traitement d'images d'au moins un amer particulier, permettant l'actualisation des fonctions de géoréférencement. D'un point de vue pratique, cette méthode est soumise à différents contraintes en termes d'autonomie et de réglementation liée à l'utilisation des drones aériens : vol à vue et zone d'interdiction de vol.

3.8 Conclusion

Ce chapitre présente un algorithme de création de cartes du trafic maritime par traitement d'images. La baie de Calvi est composée d'une flottille saisonnière d'embarcations côtières avec une majorité de petites embarcations (75 % de la flotte), et plus particulièrement de bateaux de type semi-rigide (40 % de la flotte). Le faible nombre de bateaux équipés de l'AIS, 3,7% des bateaux traversant la baie, a imposé de rechercher une méthode autre pour pouvoir identifier le trafic en zone côtière. Après une étude bibliographique sur les méthodes existantes, les méthodes choisies sont : l'étude des lignes colinéaires pour la calibration des images caméra et un seuillage local adaptatif pour la détection de mouvement. Ces méthodes allient rapidité et simplicité de mise en œuvre et procurent de bonnes performances. Ainsi, l'estimation des distorsions de la caméra (calibration) et de géoréférencement sont obtenues empiriquement par l'annotation manuelle de fichiers de référence et d'amers.

L'analyse des performances de l'algorithme de détection par traitement d'image montre que cette méthode permet une détection jusqu'à une distance de 1,6 km. Représentant alors une superficie de 3,48 km², cette portion de disque représente alors 58 % de la baie. Dans cette surface de détection, des zones d'exclusion apparaissent liées aux reliefs de la baie. L'effet du soleil rasant est un point particulièrement critique de cette méthode. D'un point de vue localisation, les écarts sont plus marqués lorsque le bateau parcourt la baie perpendiculairement à l'axe de visée, ce qui concerne les bateaux parcourant le rail « Revellata - Oscelluccia » et les bateaux quittant les plages de l'Alga et de l'Oscelluccia pour se rendre vers le large. Ces écarts de localisation sont toutefois inférieurs à 16 % de la distance minimale avec l'observatoire : 34 m à une distance de 320 m de l'observatoire et un écart de 52 m à une distance de 436 m. L'écart de localisation s'auto compense par la trajectoire du bateau lorsque l'angle entre l'axe de visée de la caméra et celui du bateau est faible. L'écart de localisation pour le rail « Revellata-Citadelle » est donc faible sur une analyse long-terme. Ces écarts de localisation sont principalement induits par le faible nombre d'amers et à leur répartition dans la baie, ainsi que par le fait que la caméra n'était pas fixe entre les différentes séquences. La précision de l'algorithme est considérablement améliorée en utilisant comme amer les coordonnées GPS d'un bateau.

Des cartes du trafic maritime sont alors estimées sur différentes échelles de temps : la semaine, la journée et l'heure. Le nombre de bateaux traversant cette baie évolue durant la journée au rythme des plaisanciers : peu de bateaux avant 9h, augmentation du nombre de bateaux de 9h à 12h, forte diminution à l'heure du repas, reprise du trafic vers 14h30 et augmentation progressive du nombre de bateaux jusqu'à 16h50 et 17h puis diminution progressive jusqu'à 19h. L'analyse des cartes du trafic à l'échelle de la journée montre que le trafic de la baie est homogène, spatialement et en nombre, entre les différentes journées de la semaine et que l'influence du facteur météorologique est conséquente. L'analyse des cartes manuscrites montre que le trafic maritime est constant entre les sessions de Juillet 2016 et Août 2015. De plus, l'analyse de la carte du trafic maritime à l'échelle de la semaine permet d'identifier la fréquentation moyenne à proximité des deux points de mesure de l'enregistreur. Le point de mesure 1, à proximité de la pointe de la Revellata est positionné au plus proche du trafic maritime, là où le nombre de détections par pixel et par heure prend de fortes valeurs. En effet, la route « Citadelle-Revellata » est la route prédominante à cause de la forte attraction de la pointe de la Revellata qui attire 40 % de la flottille. Ce point correspondant aux données de Juillet 2016. A l'inverse, le point de mesure 2 situé en face de Stareso, correspondant aux données de Juillet, Septembre et Octobre 2015, est plus éloigné du trafic (Figure 38, Figure 34). Ce résultat sur la

répartition du trafic maritime est l'un des fondements du chapitre 5 puisque les deux positions d'enregistrement représentent la variété du trafic au sein de la baie. Il est à noter que ce traitement permet aussi d'isoler les zones de mouillage récurrentes de la baie.

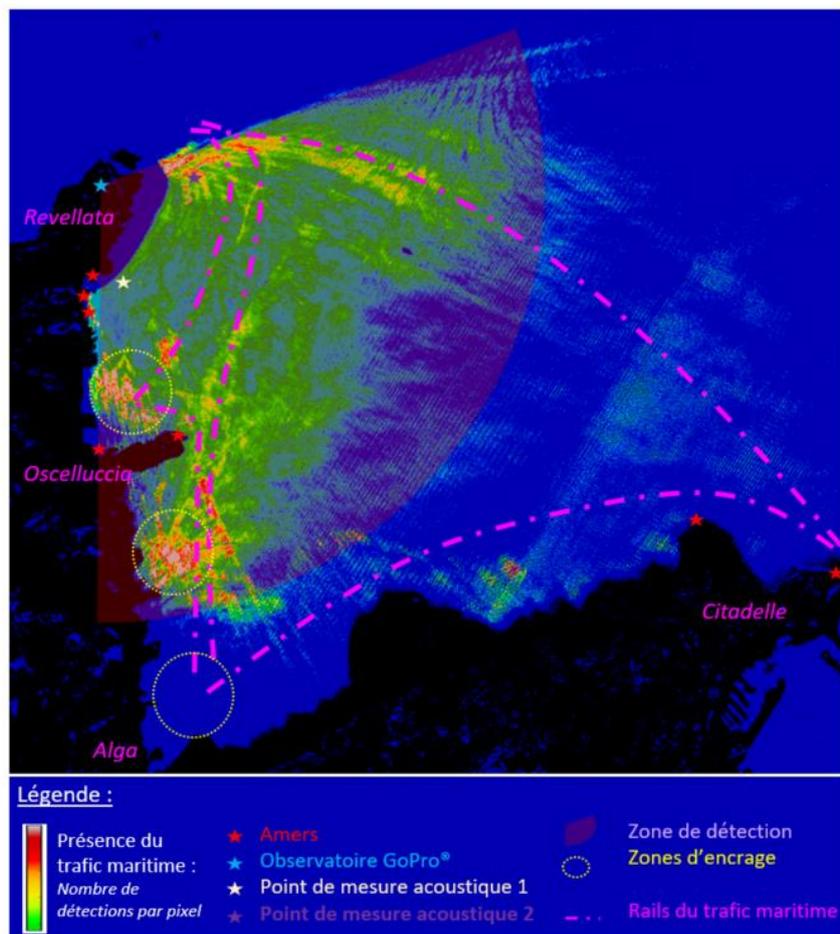


Figure 38 : Synthèse de la carte du trafic maritime

4 Chapitre 4 : Influence du trafic maritime côtier sur le bruit sous-marin de la baie de Calvi

Sommaire

4	Chapitre 4 : Influence du trafic maritime côtier sur le bruit sous-marin de la baie de Calvi	75
4.1	Introduction.....	76
4.2	Descripteurs acoustiques caractérisant le bruit rayonné par le trafic maritime : Etat de l'art77	
4.3	Présentation des descripteurs acoustiques et des indicateurs du trafic maritime.....	78
4.3.1	Présentation des descripteurs acoustiques	78
4.3.2	Indicateurs du trafic maritime.....	79
4.4	Relation entre les descripteurs acoustiques et les indicateurs du trafic maritime.....	80
4.4.1	Relation entre le SPL et le nombre de bateaux.....	80
4.4.2	Relation entre le SPL et la distance du bateau le plus proche	82
4.4.3	Relation entre l'ANL et la distance du bateau au plus proche	87
4.4.4	Relation entre l'ANL et le nombre de bateaux présent dans un disque	87
4.4.5	Solutions paramétriques simples reliant l'ANL et le nombre de bateaux.....	93
4.5	Discussion	96
4.5.1	Une étude spécifique à la baie de Calvi, non généralisable à l'ensemble des environnements côtiers	96
4.5.2	DCSMM : des indicateurs peu adaptés au suivi d'une zone côtière	96
4.5.3	Un modèle paramétrique simple mais limité permettant un suivi acoustique des environnements côtier et l'évaluation de la tendance générale sur le trafic maritime	96
4.6	Conclusion	98

4.1 Introduction

Le bruit océanique est composé d'un ensemble de sources sonores pouvant être étudiées sur deux échelles différentes : l'échelle individuelle (le bruit océanique) et l'échelle globale (le bruit de fond) [NRC_1995]. Dans le premier cas, la contribution des sources sonores individualisables est considérée, tels que l'estimation des niveaux de chaque vocalise de mammifère marins [Buckstaff_2004]. Dans le second cas, l'échelle globale fait référence au bruit ambiant gommé de toutes sources individualisables [Mathias_2016]. Cette dualité d'étude entre sources individualisable et bruit ambiant se retrouve lors de l'étude du bruit rayonné par les bateaux. Le passage d'un bateau crée une augmentation temporaire des niveaux sonores. Cette perturbation dépend de la durée du passage, du niveau source rayonné par l'embarcation et des conditions de propagation (milieu d'étude et distance du bateau). Dans ce cas, la source sonore est considérée dans son individualité et associée à un niveau source. D'autres parts, plusieurs études ont montré que depuis les années 1960, l'accroissement du trafic maritime crée une augmentation du bruit océanique pouvant dépasser 10 dB dans certaines zones [Andrew_2011, Kinda_2013a]. Abordant un point de vue global, ces études caractérisent le bruit ambiant en effaçant toute individualité liée à chaque bateau.

L'effet du trafic maritime sur le paysage acoustique doit être considéré selon deux angles distincts : une augmentation temporaire des niveaux acoustiques caractérisant chaque source individualisable et une augmentation permanente des niveaux bruit ambiant sans source individualisable caractérisant le trafic maritime global. Cette dualité nous interpelle sur le choix de descripteurs acoustiques permettant de refléter ces deux aspects et l'influence du trafic maritime sur ces descripteurs acoustiques. Ainsi, ce chapitre permet de répondre aux questions suivantes :

- *Quels descripteurs acoustiques permettent de traduire la dualité source individualisable / bruit ambiant sans individualité liée au trafic maritime côtier ?*
- *Quelle information sur le trafic maritime est portée par ces descripteurs acoustiques ?*
- *Quelle est la distance d'écoute associée à ces descripteurs acoustiques ?*
- *Est-il possible de créer un modèle simple permettant de relier un descripteur acoustique au trafic maritime ?*

Le chapitre suivant est divisé en 4 sections. La première section permet de dresser l'état de l'art sur la caractérisation des bruits de bateaux par des descripteurs acoustiques pour le suivi des paysages acoustiques, tel que les indicateurs décrits par la *Directive Cadre pour la Stratégie pour le Milieu Marin* DCMM et la relation entre le trafic maritime et les niveaux acoustiques.

La deuxième section présente les descripteurs acoustiques et les indicateurs du trafic maritime utilisés dans cette thèse. Deux descripteurs acoustiques sont considérés : le SPL, étant une mesure *RMS* du RL caractérisant les sources individualisables et l'ANL caractérisant le niveau ambiant présent en effaçant toutes sources individualisables. Parallèlement, des indicateurs caractérisant le trafic maritime sont définis en termes de distance du bateau le plus proche et du nombre de bateaux présent dans une zone par un disque autour du point d'écoute.

Le lien entre ces descripteurs acoustiques et ces indicateurs du trafic maritime est étudié dans la troisième section. Quatre combinaisons entre les descripteurs acoustiques et indicateurs du trafic maritime, présentées dans 4 sous-sections différentes, seront testées. Une estimation des distances d'écoute à partir desquelles le trafic maritime agit sur les niveaux SPL et ANL est réalisée, ainsi qu'une sélection de la bande de fréquence répondant au mieux à cette problématique de trafic côtier. La dernière sous-section sera consacrée à la réalisation d'un modèle simple permettant de relier l'ANL au nombre de bateaux présent dans un disque autour de l'enregistreur. Ces différents résultats sont ensuite discutés dans la quatrième section.

4.2 Descripteurs acoustiques caractérisant le bruit rayonné par le trafic maritime : Etat de l'art

La production sonore due au trafic maritime augmente [McDonald_2006, McDonald_2008, Andrew_2011]. En 2008, en réponse à cette préoccupation, à travers le descripteur 11 de la DCSMM, l'union européenne introduit la notion de suivi acoustique des milieux marins (« l'introduction d'énergie de sources sonores sous-marines ») en le qualifiant comme un descripteur quantitatif servant à définir « le bon état écologie » [EuropeanCommission_2008]. Des indicateurs de pollution sonore des habitats marins sont alors définis : pour les sources continues. Un suivi sur de niveaux acoustiques (SPL rms – voir 4.3.1, p 78) dans les bandes de tiers d'octave de 63 et 125 Hz est recommandé, soit par observations réelles, soit par modélisation [EuropeanCommission_2010]. L'implication du trafic maritime dans ces bandes de fréquences est mis en avant dans [Ross_1976, Tasker_2010].

Les bruits générés par les bateaux créent une augmentation du bruit ambiant jusqu'à 10 kHz pour [Schmalfeldt_1980, Buckstaff_2004, Hermannsen_2014, Merchant_2014]. Différentes études permettent de caractériser le bruit du trafic maritime dans un environnement côtier.

Parmi ces études, certaines soulignent la difficulté à caractériser l'ensemble des bruits de bateaux en utilisant seulement ces indicateurs, particulièrement pour la fréquence de 63 Hz [Hermannsen_2014, Merchant_2014]. En effet, certaines catégories de bateaux émettent dans des fréquences plus hautes [Arveson_2000, Aguilar_Soto_2006, Jensen_2009]. Pour ces environnements petit fond, la création d'une fréquence de coupure naturelle due à la bathymétrie du site [Forrest_1993] ne favorise pas l'étude du bruit induit par le trafic maritime dans les bandes de tiers d'octave de la DCSMM qui peuvent être en dessous de la fréquence de coupure. De plus, [Brooker_2016] montre une différence de niveau acoustique reçu en fonction de l'immersion de l'hydrophone et de la directivité du bruit rayonné par les bateaux.

[Hermannsen_2014] propose d'étudier la bande de tiers d'octave de 10 kHz en complément des indicateurs recommandés par la DCSMM. [Merchant_2014] propose de suivre le niveau présent dans la bande de tiers d'octave de 250 Hz et 500 Hz en montrant que l'analyse de ces deux bandes donne de meilleurs résultats lors du passage de bateaux de petite taille, et que l'étude de la bande de tiers d'octave de 250 Hz donne des résultats similaires à ceux observés sur les grands bateaux. [Sánchez-Gendriz_2016] montre la variation des niveaux sonores en fonction du trafic maritime dans deux baies brésiliennes en estimant un niveau large bande. [Buscaino_2016] étudie les niveaux sonores reçus dans plusieurs bandes de tiers d'octave dans une baie située en Sardaigne.

Parallèlement à ces études des bruits rayonnés, certaines études ont mis en évidence le lien entre des niveaux acoustiques et des informations sur le trafic maritime côtier telles que la distance, la vitesse et le nombre de bateaux. L'effet de la vitesse sur le bruit rayonné est abordé par de nombreuses études [Arveson_2000, McKenna_2013, Brooker_2016] et a été quantifié par des modèles prédictifs [Ross_1976, Breeding_1996]. Lors de l'étude de l'influence du bruit provoqué par des embarcations côtières sur les dauphins, [Buckstaff_2004] effectue une régression logarithmique entre le rapport signal à bruit et la distance au plus proche des bateaux. Cette méthode permet de mettre en évidence la présence de plusieurs familles d'embarcations dont les niveaux sources diffèrent. [Haxel_2013] s'intéresse au lien entre le niveau ambiant et le nombre de bateaux présents à la sortie d'un port. Le niveau ambiant correspond aux niveaux estimés dans la bande de fréquence 10-840 Hz et moyennés sur 1 heure. La relation entre ces deux variables est mise en avant à l'aide d'un affichage de type scatter plot et une régression linéaire ($r=0.44$).

4.3 Présentation des descripteurs acoustiques et des indicateurs du trafic maritime

La section suivante présente les descripteurs acoustiques et les indicateurs du trafic maritime choisis pour cette étude. Le sens physique suggère que le niveau acoustique estimé en utilisant une période d'écoute courte informe sur le ou les bateaux les plus proches de l'enregistreur acoustique tandis que le niveau acoustique estimé en utilisant une période d'écoute longue retransmet des informations sur l'ensemble du trafic maritime. Ainsi, pour caractériser le trafic présent dans la baie, deux descripteurs acoustiques sont estimés : un descripteur avec une courte durée d'écoute et un descripteur avec une longue durée d'écoute. Parallèlement, le trafic maritime est caractérisé par des indicateurs en termes de nombre de bateaux parcourant une zone spécifique, ainsi qu'en termes de distance au plus près et de pourcentage de présence durant la durée d'écoute.

4.3.1 Présentation des descripteurs acoustiques

Le descripteur acoustique caractérisant chaque source individualisable est le *Sound Pressure Level SPL* rms. Ce niveau s'exprime en décibels sous la référence de 1 μPa [dB re 1 μPa] et est estimé en utilisant la formule suivante :

$$SPL = 20 \log_{10} \left(\frac{1}{T} \int_{t=0}^T \frac{P(t)^2}{P_{ref}} dt \right) \quad \text{- Équation 11}$$

Avec : - $P(t)$: La pression acoustique exprimée en μPa , après filtrage sur la bande fréquentielle retenue,
 - P_{ref} : la pression acoustique de référence : 1 μPa ,
 - T : le temps d'intégration exprimé en s.

Dans cette thèse, le SPL est estimé sans recouvrement sur une courte durée d'écoute (temps d'intégration de 10 secondes) et ce sur plusieurs bandes de fréquence : la bande large de 100 Hz à 30 kHz, et les bandes de tiers d'octaves comprises entre 10 Hz et 20 kHz. Ce temps d'intégration a été choisi sur la base de plusieurs critères : ce descripteur court-terme doit permettre d'entendre l'ensemble des bateaux et correspondre au mieux avec la vérité terrain. Cette vérité terrain étant connue toutes les 10 secondes, le temps d'intégration de ce descripteur devrait idéalement être un multiple de 10 secondes. D'un point de vue acoustique, l'analyse des durées des passages de bateaux montre que la durée d'écoute dans la baie des bateaux est comprise entre 7 secondes et plusieurs minutes et prend une valeur médiane de 60 secondes [Magnier_2015]. Plus le temps d'intégration sera long, plus la contribution acoustique d'un passage court sera amoindrie par les périodes sans passage de bateaux. Par exemple, si un bateau passe durant seulement 10 secondes avec un niveau reçu de 140 dB et que le bruit ambiant est de 100 dB, l'intégration sur 1 minute de ce passage permettra d'estimer un niveau de 132 dB, soit 8 dB de moins que le niveau initial. D'un point de vue connaissance du trafic, la vitesse des bateaux présents sur zone est comprise entre 2 et 20 nœuds. Pour une vitesse de 20 nœuds un bateau parcourt 102 m en 10 secondes.

Le descripteur acoustique *Ambient Noise Level ANL* caractérise le niveau ambiant sans source individualisable. Ce niveau correspond à une estimation du pied de bruit du niveau SPL sur la durée dt [Kinda_2013b, Mathias_2016]. Durant cette période de suivi dt , le niveau SPL est estimé avec une durée d'intégration court T . La méthode des quantiles permet d'estimer le pied de bruit de la distribution de SPL. Ce niveau s'exprime en décibels sous la référence de 1 μPa [dB re 1 μPa] :

$$ANL = \frac{\text{erf}^{-1}(2Q_1).\text{Percentil}(SPL, Q1) - \text{erf}^{-1}(2Q_1).\text{Percentil}(SPL, Q2)}{\text{erf}^{-1}(2Q_1) - \text{erf}^{-1}(2Q_2)} \quad \text{- Équation 12}$$

Avec :

- SPL : Sound Pressure Level exprimé en μPa , obtenu après filtrage sur la bande fréquentielle retenue.
- Q_1, Q_2 : valeur des quantiles : 0,3 et 0,5

Ce niveau permet alors de caractériser le bruit ambiant présent dans un milieu en s'affranchissant des bruits ponctuels provoqués individuellement par chaque source. Ce masquage des sources individualisables nécessite alors une durée d'écoute suffisamment longue et adaptée à la densité de présence des bateaux. Ainsi, le niveau ANL est estimé toutes les 30 secondes en considérant le pied de bruit sur 1 heure du SPL estimée en considérant un temps d'intégration de 60 secondes. Comme pour le descripteur SPL, l'ANL est estimé sur plusieurs bandes de fréquence : la bande large de 100 Hz à 30 kHz, et dans les bandes de tiers d'octaves comprise entre 10 Hz et 20 kHz.

La Figure 39 synthétise les informations sur les deux descripteurs acoustiques.

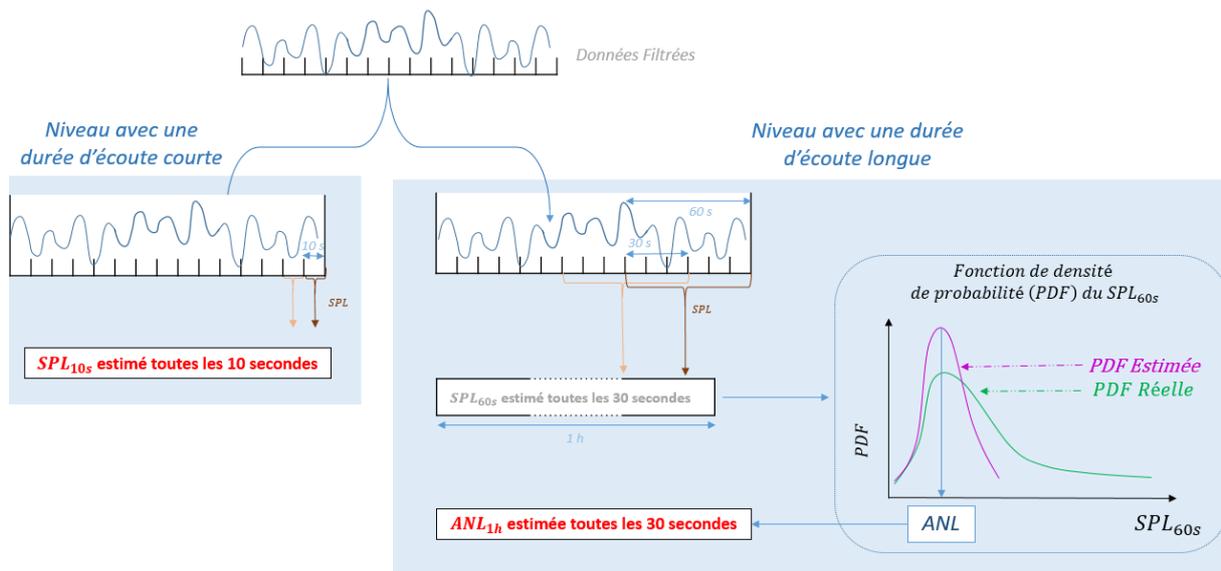


Figure 39 : Synthèse des descripteurs acoustiques

4.3.2 Indicateurs du trafic maritime

L'analyse de la base de données d'images GoPro® (*BDD GoPro*) permet d'extraire des informations sur la répartition du nombre de bateaux en fonction de la zone prédéfinie. Ainsi, toutes les 10 secondes, le nombre de bateaux présents dans cinq zones est annoté, ainsi que la distance du bateau le plus proche de l'enregistreur. Cette annotation est réalisée manuellement car l'algorithme de détection automatique (3.4.2- p53) ne permet pas une identification individualisée et précise de chaque bateau (deux bateaux proches ou un bateau créant un sillage très marqué sont des éléments difficilement identifiables et localisables). Les fonctions de géoréférencement (3.4.4 – p 56) permettent alors d'estimer les coordonnées géographiques associées à chaque pixel de l'image GoPro®.

Les cinq zones considérées pour cette étude sont des disques dont les distances limites de chaque zone sont de 100m, 300m, 500m, 1000m et 3000m (Figure 40). Les pertes acoustiques liées à la propagation du signal étant exprimées en échelle logarithmique par rapport à la distance entre une source et un récepteur, le choix de la limite pour chaque zone d'étude (100 m, 300 m, 1000 m et 3000 m) a été fixé pour que le diamètre des zones augmente en respectant une échelle logarithmique. La limite à 500 m permet en complément de définir des zones dont le diamètre augmente en respectant une variation linéaire entre les zones (100 m, 500 m et 1000 m).

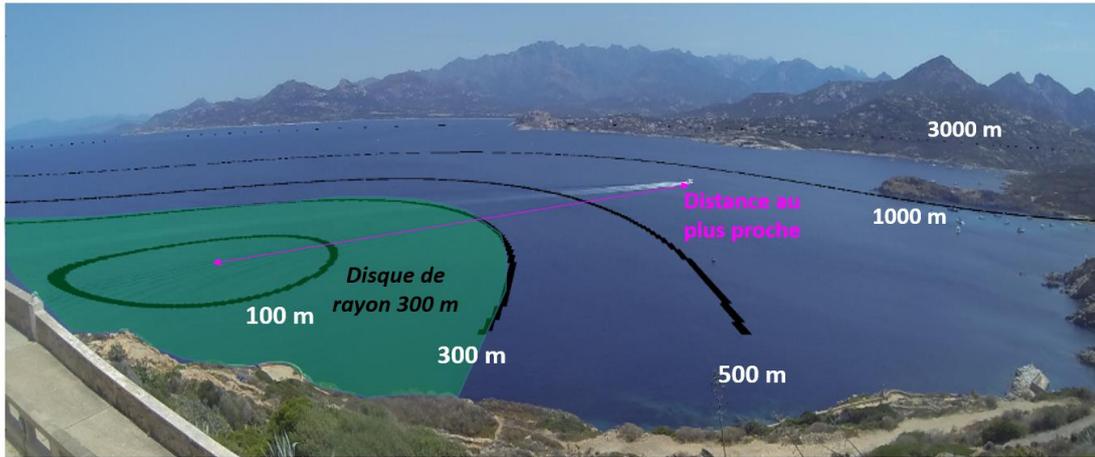


Figure 40 : Illustration des indicateurs du trafic maritime

Le trafic maritime autour de l'enregistreur est décrit par 11 indicateurs (Table 11). Les deux catégories d'indicateurs principaux sont : la distance au plus proche et le nombre de bateaux présent par zones. Dérivés des indicateurs concernant le nombre de bateaux par zone, les indicateurs « présence de bateaux » traduit par une valeur binaire si au moins un bateau est présent dans le disque d'étude.

Rayon du disque	Indicateurs du trafic maritime		
	Nombre de bateaux présent dans le disque	Présence d'un bateau dans le disque	Distance du bateau le plus proche
100 m	Trafic_Nb_D_100	Trafic_Pre_D_100	Trafic_Dist
300 m	Trafic_Nb_D_300	Trafic_Pre_D_300	
500 m	Trafic_Nb_D_500	Trafic_Pre_D_500	
1000 m	Trafic_Nb_D_1000	Trafic_Pre_D_1000	
3000 m	Trafic_Nb_D_3000	Trafic_Pre_D_3000	

Table 11 : Définition des indicateurs du trafic maritime

4.4 Relation entre les descripteurs acoustiques et les indicateurs du trafic maritime

Cette section est composée de 5 sous sections. Dans les quatre premières sous-sections, les niveaux SPL et ANL seront comparés aux indicateurs du trafic maritime. La comparaison des niveaux acoustiques et des indicateurs du trafic maritime est réalisée en utilisant les coefficients de corrélation de Pearson [McWilliam_2013, Haxel_2013, Merchant_2014, Erbe_2015], noté C_p et de Spearman [Tonolla_2011], noté C_s . Une modélisation paramétrique du niveau ANL est présentée dans la 5^{ème} sous-section.

4.4.1 Relation entre le SPL et le nombre de bateaux

Dans cette sous-section, le nombre de bateaux est alors estimé en considérant la durée d'intégration du niveau SPL : 10 secondes. Au vu du faible de bateaux présent dans cet intervalle de temps et du fait qu'une relation logarithmique ne peut considérer de valeur nulle, le lien entre le niveau SPL et le nombre de bateaux présent dans chaque disque d'écoute sont étudiées à travers deux relations :

- $SPL = SL + k \cdot \log_{10}(Nb_{bateaux})$ - Équation 13
- $SPL = SL + k \cdot Nb_{bateaux}$ - Équation 14

La Table 12 présente les valeurs de corrélation de Pearson C_P et de Spearman C_S obtenus en considérant les deux relations. Les valeurs des coefficients de corrélation sont plus importantes pour la relation liant le SPL au nombre de bateaux $eq2$. Lorsque l'on considère une relation logarithmique (Equation 13), ces coefficients sont faibles et même inférieurs à 0.3 pour les disques de 100m, 300m et 500m de rayon : il n'est pas alors possible de considérer de lien entre ces deux variables. Ces coefficients deviennent plus importants lorsque l'on considère Equation 14 : un maximum de 0.47 est atteint (rayon 500 m – bande de tiers d'octave de 2500 Hz). Pour ces deux relations, les coefficients de corrélation de Pearson et Spearman augmentent lorsque le rayon du disque augmente, atteignent un maximum pour un rayon de 500 m puis diminuent. La corrélation se renforce pour la plage de fréquence 400 Hz - 4000 Hz et devient alors supérieure à 0.4 pour la relation liant le SPL au nombre de bateaux présent dans les disques de 300m, 500m et 1000m de rayon.

Bande de tiers d'octave	Disque de rayon 100 m				Disque de rayon 300 m				Disque de rayon 500 m				Disque de rayon 1000 m				Disque de rayon 3000 m			
	$Log_{10}(Nb)$		Nb		$Log_{10}(Nb)$		Nb		$Log_{10}(Nb)$		Nb		$Log_{10}(Nb)$		Nb		$Log_{10}(Nb)$		Nb	
	C_P	C_S	C_P	C_S	C_P	C_S	C_P	C_S	C_P	C_S	C_P	C_S	C_P	C_S	C_P	C_S	C_P	C_S	C_P	C_S
10 Hz	0,12	0,11	0,21	0,18	0,13	0,13	0,28	0,27	0,20	0,19	0,30	0,28	0,22	0,22	0,27	0,28	0,16	0,15	0,16	0,15
12,5 Hz	0,10	0,09	0,20	0,19	0,13	0,11	0,27	0,25	0,18	0,17	0,28	0,27	0,20	0,20	0,25	0,25	0,10	0,08	0,10	0,09
15,75 Hz	0,11	0,10	0,19	0,17	0,12	0,11	0,26	0,25	0,17	0,15	0,26	0,25	0,18	0,17	0,21	0,21	0,05	0,02	0,05	0,04
20 Hz	0,13	0,13	0,18	0,15	0,14	0,12	0,26	0,23	0,16	0,14	0,25	0,23	0,15	0,14	0,17	0,16	0,02	-0,02	0,02	0,00
25 Hz	0,11	0,11	0,17	0,15	0,14	0,13	0,25	0,23	0,17	0,15	0,25	0,22	0,15	0,14	0,18	0,17	0,03	-0,01	0,02	0,00
31,5 Hz	0,09	0,10	0,19	0,17	0,16	0,16	0,30	0,29	0,21	0,20	0,30	0,29	0,18	0,17	0,22	0,22	0,08	0,06	0,08	0,07
40 Hz	0,13	0,13	0,19	0,16	0,17	0,15	0,27	0,26	0,19	0,18	0,26	0,25	0,16	0,15	0,19	0,18	0,04	0,01	0,04	0,02
50 Hz	0,11	0,10	0,19	0,18	0,15	0,14	0,27	0,25	0,17	0,15	0,25	0,24	0,14	0,15	0,19	0,20	0,04	0,02	0,04	0,02
63 Hz	0,05	0,06	0,18	0,17	0,13	0,12	0,26	0,25	0,14	0,13	0,23	0,23	0,16	0,15	0,21	0,21	0,08	0,05	0,08	0,06
80 Hz	0,07	0,07	0,19	0,17	0,16	0,14	0,28	0,27	0,20	0,19	0,26	0,26	0,16	0,16	0,22	0,23	0,09	0,07	0,09	0,07
100 Hz	0,08	0,08	0,22	0,20	0,17	0,16	0,30	0,29	0,23	0,22	0,31	0,30	0,22	0,22	0,28	0,30	0,18	0,17	0,17	0,17
125 Hz	0,07	0,07	0,23	0,22	0,17	0,17	0,33	0,32	0,22	0,20	0,33	0,33	0,26	0,26	0,35	0,36	0,28	0,29	0,28	0,30
160 Hz	0,07	0,06	0,20	0,20	0,16	0,16	0,32	0,31	0,23	0,23	0,34	0,33	0,28	0,28	0,36	0,37	0,32	0,34	0,31	0,34
200 Hz	0,08	0,07	0,23	0,24	0,17	0,18	0,34	0,34	0,26	0,26	0,37	0,37	0,31	0,32	0,39	0,40	0,35	0,36	0,34	0,37
250 Hz	0,10	0,09	0,24	0,23	0,19	0,19	0,35	0,35	0,25	0,26	0,37	0,38	0,29	0,32	0,39	0,41	0,35	0,36	0,33	0,36
315 Hz	0,06	0,07	0,24	0,24	0,18	0,18	0,35	0,35	0,24	0,26	0,38	0,39	0,30	0,32	0,38	0,40	0,34	0,35	0,32	0,35
400 Hz	0,07	0,07	0,27	0,26	0,19	0,19	0,36	0,36	0,26	0,26	0,40	0,41	0,31	0,32	0,39	0,40	0,33	0,33	0,31	0,34
500 Hz	0,09	0,08	0,28	0,28	0,18	0,18	0,38	0,38	0,25	0,24	0,40	0,42	0,29	0,30	0,37	0,40	0,32	0,33	0,30	0,33
630 Hz	0,08	0,08	0,30	0,29	0,18	0,18	0,40	0,41	0,25	0,25	0,41	0,44	0,29	0,31	0,37	0,40	0,31	0,32	0,29	0,33
800 Hz	0,06	0,06	0,30	0,30	0,18	0,19	0,41	0,42	0,26	0,27	0,42	0,45	0,30	0,32	0,38	0,41	0,31	0,33	0,29	0,32
1000 Hz	0,06	0,06	0,30	0,29	0,20	0,20	0,42	0,43	0,28	0,28	0,43	0,46	0,31	0,33	0,38	0,42	0,31	0,33	0,29	0,33
1250 Hz	0,07	0,07	0,30	0,30	0,21	0,22	0,44	0,44	0,29	0,29	0,44	0,46	0,32	0,34	0,39	0,43	0,31	0,34	0,30	0,34
1600 Hz	0,06	0,06	0,31	0,30	0,22	0,23	0,44	0,44	0,30	0,31	0,44	0,46	0,32	0,34	0,39	0,43	0,30	0,34	0,29	0,33
2000 Hz	0,07	0,06	0,30	0,29	0,22	0,22	0,43	0,44	0,30	0,31	0,44	0,46	0,32	0,35	0,39	0,43	0,29	0,34	0,28	0,33
2500 Hz	0,09	0,07	0,27	0,27	0,21	0,21	0,42	0,43	0,30	0,29	0,44	0,47	0,33	0,37	0,39	0,45	0,28	0,32	0,28	0,32
3150 Hz	0,09	0,07	0,26	0,26	0,21	0,21	0,40	0,42	0,30	0,30	0,42	0,46	0,30	0,34	0,36	0,42	0,26	0,32	0,27	0,32
4000 Hz	0,07	0,07	0,23	0,24	0,21	0,22	0,37	0,38	0,27	0,29	0,38	0,43	0,27	0,30	0,32	0,37	0,23	0,28	0,24	0,27
5000 Hz	0,05	0,06	0,20	0,20	0,19	0,20	0,33	0,34	0,25	0,26	0,34	0,37	0,24	0,26	0,27	0,29	0,18	0,17	0,19	0,17
6300 Hz	0,03	0,03	0,17	0,17	0,16	0,16	0,30	0,27	0,20	0,20	0,29	0,28	0,21	0,20	0,23	0,20	0,11	0,05	0,12	0,06
8000 Hz	0,02	0,02	0,15	0,15	0,15	0,14	0,27	0,24	0,20	0,18	0,26	0,24	0,19	0,17	0,20	0,16	0,07	0,01	0,08	0,02
10000 Hz	0,03	0,03	0,13	0,12	0,14	0,13	0,23	0,20	0,17	0,15	0,23	0,19	0,17	0,15	0,16	0,13	0,03	-0,03	0,04	-0,02
12500 Hz	0,03	0,04	0,13	0,12	0,13	0,14	0,22	0,20	0,17	0,16	0,23	0,21	0,17	0,16	0,17	0,14	0,05	0,00	0,06	0,00
16000 Hz	0,03	0,04	0,12	0,11	0,13	0,13	0,20	0,17	0,16	0,15	0,20	0,17	0,15	0,13	0,14	0,10	0,02	-0,03	0,03	-0,03
20000 Hz	0,02	0,02	0,11	0,11	0,11	0,10	0,18	0,15	0,14	0,12	0,17	0,14	0,14	0,12	0,12	0,08	0,00	-0,05	0,01	-0,05
Large bande 100Hz-30 kHz	$Log_{10}(Nb)$		Nb		$Log_{10}(Nb)$		Nb		$Log_{10}(Nb)$		Nb		$Log_{10}(Nb)$		Nb		$Log_{10}(Nb)$		Nb	
	C_P	C_S	C_P	C_S	C_P	C_S	C_P	C_S	C_P	C_S	C_P	C_S	C_P	C_S	C_P	C_S	C_P	C_S	C_P	C_S
	0,09	0,07	0,26	0,26	0,19	0,2	0,38	0,38	0,27	0,27	0,38	0,4	0,28	0,31	0,33	0,36	0,20	0,21	0,21	0,22

Table 12 : Coefficient de corrélation de Pearson C_P et de Spearman C_S entre le niveau SPL et les nombre de bateaux Nb ou le logarithme en base dix du nombre de bateaux $log_{10}(Nb)$ présent dans un disque de 100m à 3000 m

Les indicateurs correspondant au nombre de bateaux par zone ($Trafic_Nb_X$) permettent de traduire deux informations : la présence de bateaux dans une zone et le nombre de bateaux présents dans cette zone. Pour les disques de 100m, 300m et 500m, les différences entre les coefficients de corrélation entre les indicateurs du nombre de bateaux ($Trafic_Nb_X$) et les indicateurs de la présence d'un bateau ($Trafic_Pre_X$) sont faibles (différence de corrélation maximale de 0,0545 pour le disque de 500m de rayon) (Figure 47). Cette observation permet de conclure que le lien entre le niveau SPL et les indicateurs $Trafic_Nb_X$ réside dans l'information traduisant la présence ou l'absence de bateaux pour une certaine zone et non dans l'information concernant le nombre de bateaux.

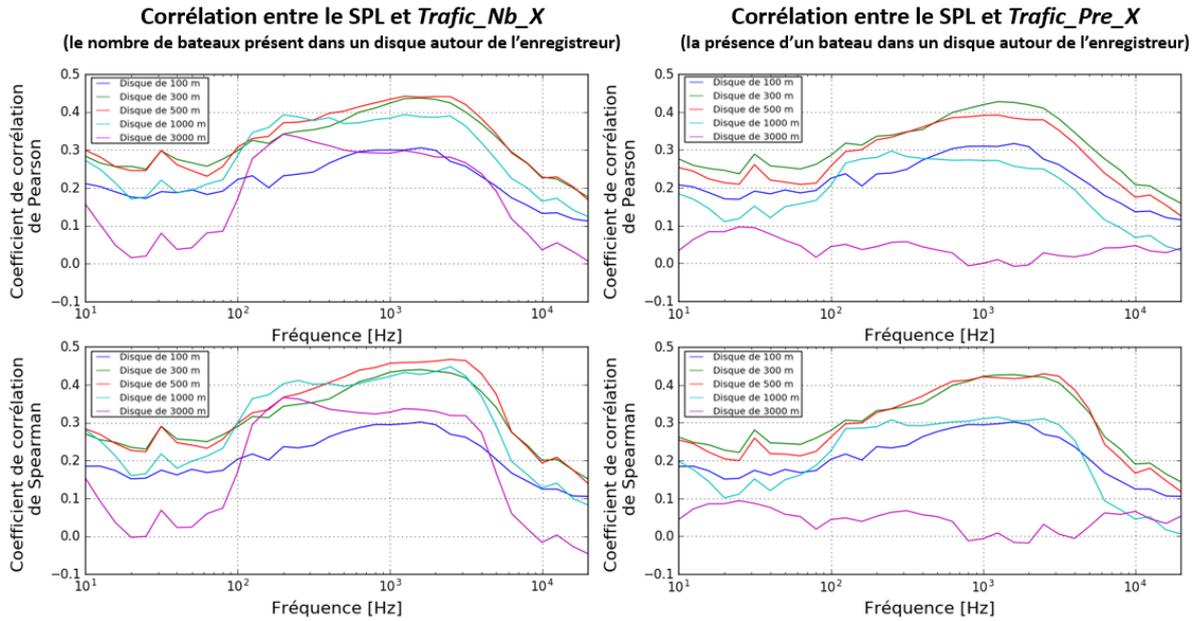


Figure 41 : Corrélation de Pearson (en haut) et de Spearman (en bas) entre le SPL et *Trafic_Nb_X* (à gauche) et entre le SPL et *Trafic_Pre_X* (à droite) en fonction des bandes de tiers d'octaves

Les différences de corrélation observées en fonction du rayon du disque entre le SPL et les indicateurs de la présence d'un bateau dans la zone d'étude (*Trafic_Pre_X*) montre l'importance du facteur distance des bateaux. Malgré des valeurs de corrélation supérieure à 0.4, ces indicateurs du trafic maritime (*Trafic_Nb_X*, *Trafic_Pre_X*) ne sont pas les plus appropriés pour traduire l'information portée par le niveau SPL.

4.4.2 Relation entre le SPL et la distance du bateau le plus proche

Au regard des résultats observés dans la sous-section précédente, le lien entre le SPL et l'indicateur correspondant à la distance du bateau le plus proche est étudié. Une anti-corrélation est observée entre le SPL et la distance du bateau le plus proche. Cette anti-corrélation est plus élevée lorsque l'indicateur du trafic maritime correspond au logarithme en base dix de la distance du bateau le plus proche. Pour la suite de cette sous-section, le lien entre ces deux variables est étudié en considérant la relation suivante :

$$SPL = SL + k \cdot \log_{10}(D) \quad - \quad \text{Équation 15} \quad - \quad \text{Avec } D \text{ la distance du bateau le plus proche}$$

La Table 13 (Colonnes : *ensemble des données* – p 86) regroupe les valeurs des deux coefficients de corrélation, obtenues pour les différentes fréquences de bandes de tiers d'octave, ainsi que les valeurs de *SL* et *k* obtenue par régression linéaire entre le SPL le logarithme en base 10 de la distance du bateau le plus proche. Les deux coefficients suivent la même évolution en fonction de la bande de tiers d'octave considérée. Les valeurs absolues de la corrélation augmentent en fonction de la fréquence pour atteindre un maximum pour la bande de tiers d'octave de 1250 Hz (maximum de 0.5 et 0.51) puis diminuent. Les coefficients de corrélation sont, en valeurs absolue, supérieurs à 0,4 entre la bande de tiers d'octave allant de 200 Hz à 3150 Hz. Cette perte de corrélation en basse fréquence est due à des effets bathymétriques. La propagation des basses fréquences est perturbée dans les eaux peu profondes, ainsi apparaît une fréquence de coupure de propagation au sein du canal [Hughes_1990, Forrest_1993, D'Spain_1999]. La diminution de la corrélation en haute fréquence est due à l'inadéquation entre la largeur du miroir de Lloyds et la durée d'intégration du SPL. Ainsi, lorsque la durée d'intégration augmente, les coefficients de corrélation augmentent en haute fréquence. Le coefficient de pente *k* est compris entre -1 et -10.5. Plus les coefficients de corrélation sont importants (en valeur absolue), plus la pente s'accroît (augmentation en valeur absolue de *k*). L'évolution de *k*, en fonction des bandes de tiers d'octave, est analogue à celle

observée pour les deux coefficients de corrélation : une diminution est observée jusqu'à la bande de tiers d'octave de 1250 Hz suivie d'une augmentation du coefficient. Au-dessus de 4 kHz, la croissance de k est fortement marquée. Ce coefficient k est inférieur à -9 pour les bandes de tiers d'octave allant de 160 Hz à 2000 Hz.

Les niveaux acoustiques estimés sur une bande large, la bande 100Hz-30 kHz, et sur la bande de tiers d'octave où les coefficients de corrélation sont maximaux, la bande de tiers d'octave de 1250 Hz semble être moins sensible aux effets bathymétriques et aux effets de propagation. Ces deux bandes de fréquence seront donc retenues pour la suite de l'étude. Pour les deux bandes de fréquences, la visualisation du niveau SPL en fonction du logarithme en base dix de la distance la plus proche prend la forme d'un triangle rectangle (Figure 42). Cette forme est plus marquée pour la bande de fréquence 10 Hz – 30 kHz. Les deux côtés proches de l'angle droit sont fixés :

- Pour le côté *SPL*, par le niveau du bruit ambiant 10 secondes,
- Pour le côté *Distance*, par la distance minimale de l'enregistreur acoustique qui correspond à la hauteur de l'eau.

La longueur du côté *Distance* permet de visualiser la variabilité du niveau sonore des bateaux présents dans la baie, alors que la longueur du côté *SPL* permet d'estimer la distance d'écoute. L'hypoténuse définit, pour une distance précise, la limite du niveau reçu par l'enregistreur acoustique. La pente formée par l'hypoténuse caractérise les pertes de transmission dues à la propagation du son.

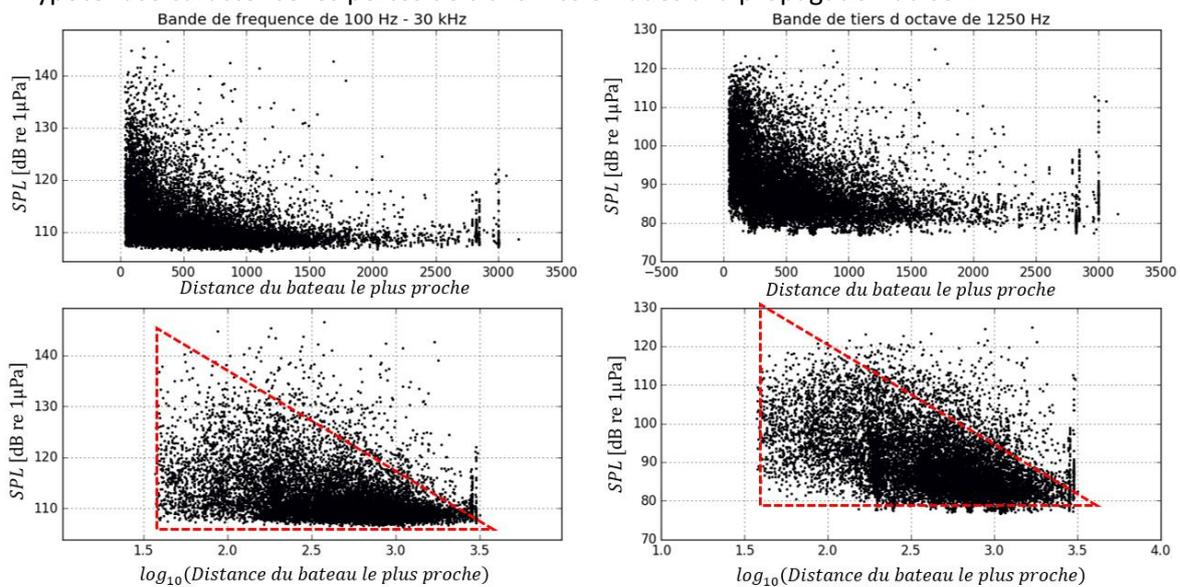


Figure 42 : SPL en fonction de la distance du bateau au plus proche (en haut) et en fonction du logarithme en base dix de cette distance (en bas), pour la bande de fréquence 10 Hz – 30 kHz (à gauche) et la bande de tiers d'octave de 1250 Hz (à droite)

D'autres formes de répartition du SPL en fonction de cet indicateur étaient attendues telles qu'une ligne droite ou un parallélogramme. Ces deux formes auraient été obtenues en considérant un trafic maritime homogène et régulier en termes de vitesse et de type de navires et dont l'éloignement avec l'enregistreur est supérieur à la distance d'écoute de ces bateaux. Cette forme triangulaire s'explique par :

- La variabilité de SL : la diversité des navires et l'écart important entre les vitesses, ces deux paramètres créent une diversité de niveaux sources.
- Le positionnement dans la baie et le masquage par le bruit ambiant stable : les distances au plus proche sont supérieures à la distance d'écoute du bateau pour 27,5 % des instants, le niveau enregistré correspond alors au bruit ambiant. Cette variabilité de niveaux sources a un impact moins important lorsque la distance du bateau au plus proche augmente, due au masquage par le bruit ambiant.

L'étude de cette variabilité est réalisée en considérant des sous-ensembles du SPL créés en fonction de la distance au plus proche par rapport à l'enregistreur. 200 anneaux sont alors considérés en utilisant une échelle linéaire avec un pas de 15,6 m pour une distance inférieure à 2000 m. Pour chaque sous-ensemble, les valeurs des trois premiers quartiles du sous-ensemble de SPL par anneaux, ainsi que le *whisker*, sont estimées. Le *whisker* correspond au 3^{ème} quartile additionné de 1,5 fois l'intervalle interquartile (Q3–Q1). Cette opération est réalisée pour chaque bande d'étude avec étude de la relation suivante :

$$SPL_{Q_i,f} = SL_{Q_i,f} + k_{Q_i,f} \cdot \log_{10}(R_{anneaux}) - \text{Équation 16}$$

Avec : Q_i le quartile considérée et $R_{anneaux}$ correspondant au rayon moyen des anneaux.

La Table 13 (Colonnes : Q1, Q2, Q3 et *whisker* - p 86) regroupe les valeurs des deux coefficients de corrélation, obtenues pour les différentes fréquences de bandes de tiers d'octave, ainsi que les valeurs $SL_{Q_i,f}$ et $k_{Q_i,f}$ obtenue par régression linéaire entre les $i^{\text{èmes}}$ quartiles du SPL pour chaque anneaux et le logarithme en base 10 de l'éloignement de l'anneau. Une forte augmentation des coefficients de corrélation est observée par rapport à l'étude réalisée sur l'ensemble des données. Pour une fréquence de tiers d'octave considérée, ces coefficients augmentent lorsque l'indice du quartile augmente et atteignent un maximum pour Q3. Globalement, ces coefficients deviennent supérieurs à 0.75 pour 100 Hz - 4 kHz. Les valeurs maximales sont observées entre les trois bandes de tiers d'octaves successives de 2000 Hz (Q2), 2500 Hz (*whisker*) et 3125 Hz (Q1, Q3) et sont sensiblement proche des valeurs observées pour la bande de tiers de 1250 Hz. Les coefficients de corrélation atteignent 0,84 à 0,92 pour la bande 10 Hz – 30 kHz et de 0,91 à 0,95 pour la bande de tiers d'octave de 1250 Hz.

En accord avec la forme triangulaire observée précédemment, le coefficient de pentes $k_{Q_i,f}$ augmente lorsque l'indice du quartile augmente et est maximum pour le *whisker*. Des similarités sont observées entre le coefficient correspondant à la médian $k_{Q_2,f}$ et le coefficient de pente k observé sur l'ensemble des données. Exceptés pour Q1, les maximums des coefficients de pentes $k_{Q_i,f}$ sont observés pour les bandes de tiers d'octave où les coefficients de corrélation sont maximums (et supérieurs à 0.9). Pour ces bandes de tiers d'octave, $k_{Q_i,f}$ est de l'ordre de -10 (Q2), -13 (Q3) et -25 (*Whisker*).

La Figure 43 représente le spectre de $SL_{Q_i,f}$ et de $k_{Q_i,f}$ estimés pour les différents quartiles. Les 4 spectres sont caractérisés par un spectre de type bosse de bruit atteignant un maximum entre la bande de tiers d'octave de 200 Hz et de 250 Hz. Cette observation est en adéquation avec les modèles de classiques présentés dans le chapitre 1 (1.5.3 - p 24). Les spectres de Q2, Q3 et du *whisker* sont caractérisés par une autre bosse de bruit supplémentaire, d'amplitude plus faible pour Q2 et Q3, dont le maximum est à noter entre les bandes de tiers d'octave de 1250 Hz et de 2000 Hz.

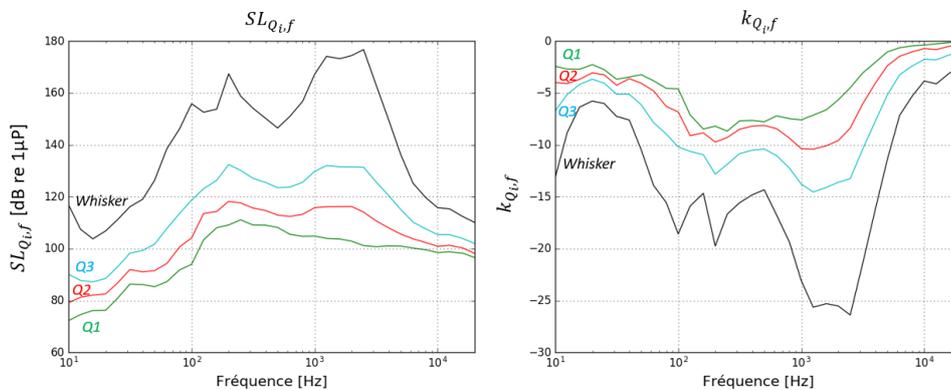


Figure 43 : Niveau $SL_{Q_i,f}$ (à gauche) et coefficient de pente $k_{Q_i,f}$ (à droite) en fonction de la bande de tiers d'octave pour les différents quartiles (Q1 : vert - Q2 : rouge - Q3 : bleu - Whisker : noir)

En raison de la forte variabilité du SPL dans les premiers anneaux et du potentiel risque de masquage par le bruit ambiant, les valeurs obtenues lors de la régression linéaire restent difficilement interprétables. Un élément notable est observé. Contrairement au niveau des quartiles, l'analyse du *whisker*, correspondant au son les plus forts entendus, permet de diminuer fortement le nombre d'échantillon soumis à l'effet du masquage par le bruit ambiant et ainsi, augmente la probabilité que chaque échantillon correspond bien au niveau émis par le bateau. Pour une distance inférieure à 2000 m, la corrélation linéaire sur la bande large 100Hz-30kHz du *whisker* montre que l'hypoténuse du triangle suit la loi : $162 + 15,74 \cdot \log_{10}(D)$ avec D la distance du bateau le plus proche. Le coefficient de régression linéaire obtenu est alors de 0,93. Cette loi permet alors d'estimer la pente formée par l'hypoténuse : 15. De plus, en considérant 15 comme étant le coefficient de perte de transmission géométrique [Greene_1987, Miles_1987, Murphy_1976], cette loi reflète l'éloignement de la famille de bateaux la plus bruyante dont le niveau source (*Source Level*) est de 162 dB [Erbe_2002, Gervaise_2012a]. Cette observation reste cependant vérifiée seulement sur le niveau large bande.

Les portées de détection du descripteur acoustique SPL sont estimées par estimation de la probabilité de dépassement du niveau ambiant pour un ensemble d'anneaux d'écoute. Ainsi, l'espace des distances du bateau le plus proche est à nouveau divisé en 200 anneaux dont le rayon est défini par une échelle linéaire de pas de 15.6 m. Le bruit ambiant est défini comme étant le pied de bruit de l'ensemble des observations et estimées en utilisant la méthode des centiles. Ce bruit ambiant vaut 110,24 dB pour la bande 100Hz-30kHz et de 87,67 dB pour la bande de tiers d'octave de 1250 Hz. Pour chaque sous-ensemble, la probabilité que le niveau soit supérieur à cette valeur est estimée. Cette probabilité diminue en suivant une loi logarithmique lorsque la distance de l'anneau augmente. Le coefficient de régression linéaire de la probabilité en fonction du logarithme en base dix de la distance de l'anneau est de 0,931 à 0,943, pour une distance allant jusqu'à 2000 m (Figure 44). Cette probabilité est supérieure à 50 % pour une distance de 420 m pour les deux bandes de fréquence.

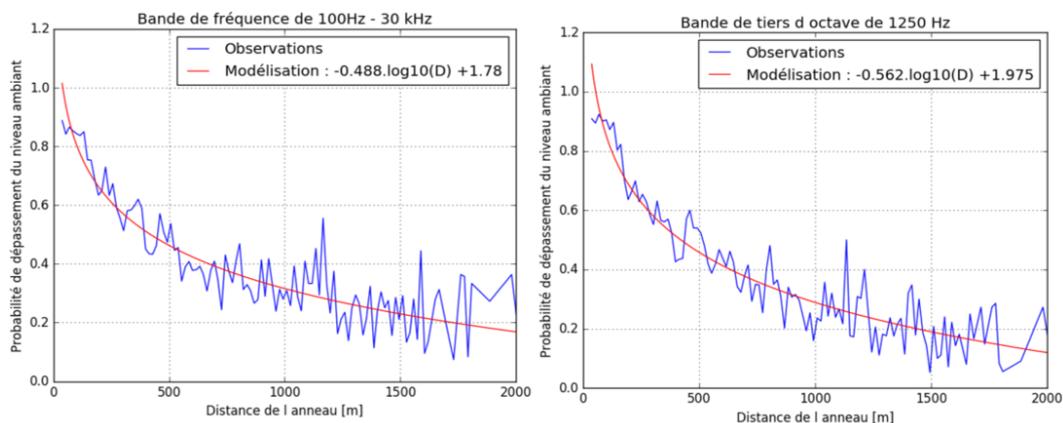


Figure 44 : Probabilité de dépassement du niveau ambiant en fonction de la distance de l'anneau, pour la bande de fréquence 100Hz- 30 kHz (à gauche) et pour la bande de tiers d'octave de 1250 Hz (à droite), observations (en bleu) et modélisation par une loi logarithmique (en rouge)

Le descripteur SPL permet donc d'apporter des informations sur le bateau le plus proche jusqu'à une distance entre 400 et 450 m.

Bande de tiers d'octave	Ensemble des données				Q1 : 25 ^{ème} centile				Q2 : 50 ^{ème} centile				Q3 : 75 ^{ème} centile				Whisker : Q3 + 1.5(Q3-Q1)			
	C_p	C_s	SL	k	C_p	C_s	SL _{Q1}	k _{Q1}	C_p	C_s	SL _{Q2}	k _{Q2}	C_p	C_s	SL _{Q3}	k _{Q3}	C_p	C_s	SL _W	k _W
10 Hz	-0,326	-0,321	82,8	-4,94	-0,739	-0,575	72,3	-2,42	-0,850	-0,716	79,2	-3,98	-0,902	-0,809	90,1	-6,71	-0,903	-0,845	116,9	-13,15
12,5 Hz	-0,317	-0,313	83,4	-4,61	-0,706	-0,505	74,6	-2,69	-0,779	-0,690	81,3	-4,10	-0,818	-0,681	87,7	-5,15	-0,757	-0,670	107,5	-8,83
15,75 Hz	-0,299	-0,289	84,4	-4,39	-0,581	-0,358	76,2	-2,72	-0,699	-0,558	82,1	-3,69	-0,750	-0,587	87,2	-4,18	-0,624	-0,583	103,8	-6,36
20 Hz	-0,273	-0,254	86,6	-4,46	-0,409	-0,166	76,2	-2,26	-0,526	-0,330	82,5	-3,05	-0,690	-0,531	88,5	-3,66	-0,536	-0,540	106,8	-5,77
25 Hz	-0,277	-0,260	90,9	-4,80	-0,426	-0,238	80,9	-2,75	-0,582	-0,408	86,8	-3,24	-0,742	-0,592	93,0	-4,05	-0,572	-0,565	111,2	-6,01
31,5 Hz	-0,322	-0,316	96,1	-5,70	-0,594	-0,344	86,3	-3,67	-0,691	-0,559	92,0	-4,25	-0,744	-0,600	98,3	-5,10	-0,567	-0,521	116,2	-7,25
40 Hz	-0,287	-0,276	95,9	-5,34	-0,490	-0,323	86,2	-3,46	-0,589	-0,443	91,5	-3,62	-0,741	-0,571	99,3	-5,11	-0,568	-0,502	119,0	-7,59
50 Hz	-0,294	-0,285	96,5	-5,64	-0,571	-0,359	85,3	-3,24	-0,699	-0,496	91,5	-4,06	-0,793	-0,612	101,7	-6,13	-0,727	-0,612	126,3	-10,47
63 Hz	-0,293	-0,286	99,7	-6,39	-0,632	-0,447	87,3	-3,82	-0,727	-0,562	94,3	-4,78	-0,837	-0,726	107,8	-7,85	-0,778	-0,713	138,6	-13,90
80 Hz	-0,301	-0,304	103,4	-6,73	-0,741	-0,638	91,9	-4,55	-0,851	-0,730	100,7	-6,29	-0,823	-0,699	113,6	-8,96	-0,763	-0,657	146,3	-15,56
100 Hz	-0,352	-0,347	107,4	-7,61	-0,781	-0,628	94,0	-4,60	-0,813	-0,653	104,1	-6,83	-0,864	-0,756	118,7	-10,20	-0,807	-0,714	155,9	-18,59
125 Hz	-0,390	-0,384	112,9	-8,51	-0,912	-0,853	103,4	-7,11	-0,875	-0,863	113,5	-9,11	-0,868	-0,843	123,1	-10,62	-0,746	-0,691	152,6	-15,89
160 Hz	-0,380	-0,379	116,3	-9,13	-0,826	-0,789	108,1	-8,47	-0,797	-0,776	114,4	-8,84	-0,852	-0,829	126,4	-10,95	-0,705	-0,694	153,8	-14,66
200 Hz	-0,410	-0,412	120,9	-10,38	-0,783	-0,746	109,1	-8,19	-0,866	-0,856	118,2	-9,73	-0,901	-0,879	132,4	-12,82	-0,815	-0,829	167,4	-19,75
250 Hz	-0,421	-0,422	120,4	-10,04	-0,828	-0,830	111,1	-8,67	-0,880	-0,871	117,6	-9,28	-0,914	-0,903	130,2	-11,87	-0,818	-0,785	158,8	-16,68
315 Hz	-0,428	-0,426	119,2	-9,56	-0,795	-0,763	109,1	-7,69	-0,874	-0,825	115,7	-8,49	-0,910	-0,843	127,1	-10,84	-0,802	-0,736	154,1	-15,57
400 Hz	-0,442	-0,442	117,5	-9,03	-0,848	-0,799	109,1	-7,65	-0,902	-0,831	114,7	-8,19	-0,917	-0,864	125,5	-10,51	-0,816	-0,749	150,2	-14,81
500 Hz	-0,460	-0,466	116,2	-9,06	-0,875	-0,813	108,2	-7,78	-0,884	-0,793	113,0	-8,13	-0,909	-0,818	123,5	-10,39	-0,804	-0,694	146,5	-14,32
630 Hz	-0,475	-0,486	115,5	-9,26	-0,879	-0,764	104,8	-7,21	-0,896	-0,783	112,4	-8,43	-0,920	-0,822	123,7	-11,03	-0,866	-0,766	151,0	-16,76
800 Hz	-0,482	-0,495	115,3	-9,66	-0,898	-0,790	104,8	-7,46	-0,932	-0,858	113,3	-8,34	-0,929	-0,857	123,6	-12,22	-0,886	-0,824	156,8	-19,35
1000 Hz	-0,487	-0,506	117,0	-10,29	-0,907	-0,781	104,9	-7,58	-0,945	-0,870	115,8	-10,36	-0,940	-0,879	129,8	-13,78	-0,908	-0,860	167,2	-23,09
1250 Hz	-0,491	-0,509	117,3	-10,33	-0,910	-0,808	104,0	-7,14	-0,940	-0,858	116,2	-10,41	-0,947	-0,893	132,0	-14,54	-0,921	-0,887	174,2	-25,65
1600 Hz	-0,484	-0,503	116,8	-9,76	-0,903	-0,810	103,8	-6,62	-0,942	-0,876	116,2	-10,08	-0,949	-0,892	131,6	-14,09	-0,924	-0,883	173,2	-25,30
2000 Hz	-0,477	-0,505	116,9	-9,21	-0,903	-0,824	102,9	-5,65	-0,947	-0,898	116,2	-9,58	-0,948	-0,883	131,5	-13,60	-0,925	-0,874	174,4	-25,52
2500 Hz	-0,462	-0,507	116,0	-8,43	-0,895	-0,802	101,2	-4,49	-0,939	-0,889	114,1	-8,38	-0,954	-0,905	131,4	-13,25	-0,938	-0,903	176,8	-26,40
3150 Hz	-0,428	-0,486	113,3	-6,45	-0,920	-0,872	100,8	-3,08	-0,920	-0,858	110,8	-6,07	-0,953	-0,907	125,8	-10,44	-0,942	-0,901	163,3	-21,48
4000 Hz	-0,382	-0,433	111,3	-4,80	-0,919	-0,848	101,1	-2,03	-0,914	-0,830	108,0	-4,05	-0,941	-0,874	120,5	-7,70	-0,929	-0,821	149,6	-16,19
5000 Hz	-0,335	-0,372	109,3	-3,36	-0,815	-0,547	101,0	-1,05	-0,875	-0,698	105,6	-2,38	-0,910	-0,797	115,2	-5,20	-0,907	-0,814	136,4	-11,43
6300 Hz	-0,291	-0,288	107,1	-2,45	-0,438	-0,173	100,2	-0,64	-0,697	-0,368	103,8	-1,46	-0,866	-0,663	110,3	-3,24	-0,877	-0,762	125,3	-7,15
8000 Hz	-0,257	-0,249	105,3	-1,90	-0,333	-0,133	99,6	-0,45	-0,538	-0,242	102,4	-1,02	-0,833	-0,594	107,6	-2,38	-0,861	-0,723	119,7	-5,27
10000 Hz	-0,219	-0,209	103,8	-1,59	-0,254	-0,153	98,5	-0,37	-0,328	-0,097	100,9	-0,72	-0,760	-0,470	105,4	-1,76	-0,772	-0,600	115,8	-3,84
12500 Hz	-0,180	-0,215	103,6	-1,45	-0,253	-0,028	98,8	-0,26	-0,571	-0,264	101,3	-0,82	-0,773	-0,494	105,4	-1,80	-0,802	-0,618	115,3	-4,12
16000 Hz	-0,226	-0,173	102,7	-1,20	-0,118	0,040	98,3	-0,14	-0,347	-0,063	100,3	-0,49	-0,679	-0,414	103,9	-1,31	-0,718	-0,575	112,4	-3,08
20000 Hz	-0,166	-0,155	101,0	-1,11	-0,085	0,048	96,6	-0,11	-0,160	0,070	98,2	-0,28	-0,612	-0,338	102,0	-1,10	-0,654	-0,486	110,1	-2,59
Large bande	C_p	C_s	SL	k	C_p	C_s	SL _{Q1}	k _{Q1}	C_p	C_s	SL _{Q2}	k _{Q2}	C_p	C_s	SL _{Q3}	k _{Q3}	C_p	C_s	SL _W	k _W
100Hz-30 KHz	-0,396	-0,43	126,1	-5,23	-0,845	-0,607	114,5	-1,96	-0,900	-0,791	122,0	-4,19	-0,930	-0,859	133,5	-7,47	-0,927	-0,870	162,0	-15,75

Table 13 : Coefficient de corrélation de Pearson C_p , de Spearman C_s , coefficient k et niveau à l'origine de la régression linéaire entre le SPL et le logarithme en base dix de la distance du bateau le plus proche, pour l'ensemble des données ou pour les 3 premiers quartiles et le whisker

4.4.3 Relation entre l'ANL et la distance du bateau au plus proche

Dans cette sous-section, le lien entre le niveau ANL et la distance du bateau le plus proche est étudié afin de tester la relation suivante :

$$ANL = ANL_0 + k \cdot \log_{10}(D) - \quad \text{Équation 17}$$

Le niveau ANL dépend faiblement du logarithme en base dix de la distance la plus proche des navires. Les coefficients sont faibles : compris entre -0.20 et 0.14 (Table 14). La corrélation entre ces deux grandeurs est plus importante pour les hautes fréquences : les coefficients de corrélation sont supérieurs à 0.09 pour le niveau large bande et les bandes de tiers d'octave supérieures à 8 kHz.

Ces résultats étaient attendus. En effet, l'indicateur distance du bateau le plus proche caractérise les sources acoustiques dans leurs individualités alors que le descripteur acoustique ANL cherche à effacer ces individualités pour extraire le bruit ambiant.

Bandes de tiers d'octave	C_P	C_S	Bandes de tiers d'octave	C_P	C_S
10 Hz	0,012	-0,017	500 Hz	-0,176	-0,168
12,5 Hz	0,063	0,003	630 Hz	-0,180	-0,163
15,75 Hz	0,055	0,005	800 Hz	-0,150	-0,132
20 Hz	0,050	0,011	1000 Hz	-0,178	-0,164
25 Hz	0,024	0,008	1250 Hz	-0,184	-0,176
31,5 Hz	-0,015	-0,021	1600 Hz	-0,164	-0,155
40 Hz	-0,009	-0,015	2000 Hz	-0,151	-0,143
50 Hz	-0,026	-0,013	2500 Hz	-0,125	-0,125
63 Hz	-0,042	-0,034	3150 Hz	-0,109	-0,112
80 Hz	-0,130	-0,136	4000 Hz	-0,077	-0,063
100 Hz	-0,140	-0,138	5000 Hz	0,009	0,057
125 Hz	-0,117	-0,098	6300 Hz	0,083	0,083
160 Hz	-0,201	-0,193	8000 Hz	0,101	0,093
200 Hz	-0,165	-0,129	10000 Hz	0,108	0,093
250 Hz	-0,167	-0,146	12500 Hz	0,128	0,118
315 Hz	-0,171	-0,153	16000 Hz	0,126	0,118
400 Hz	-0,163	-0,151	20000 Hz	0,136	0,143
Large bande	C_P	C_S			
100 Hz–30 kHz	-0,104	-0,113			

Table 14 : Coefficient de corrélation de Pearson C_P et de Spearman C_S entre le niveau ANL et le logarithme de distance au plus proche

4.4.4 Relation entre l'ANL et le nombre de bateaux présent dans un disque

La Figure 42 présente l'évolution de l'ANL dans la bande 100 Hz-30 kHz en fonction du nombre de bateaux : pour un nombre faible de bateaux, ces deux paramètres semblent moins liés. Ce nombre minimal varie en fonction du rayon du disque considéré et est de 6 bateaux pour le disque de 100m, 12 bateaux pour le disque de 300m, 15 bateaux pour le disque de 500m, 18 bateaux pour le disque de 1000m.

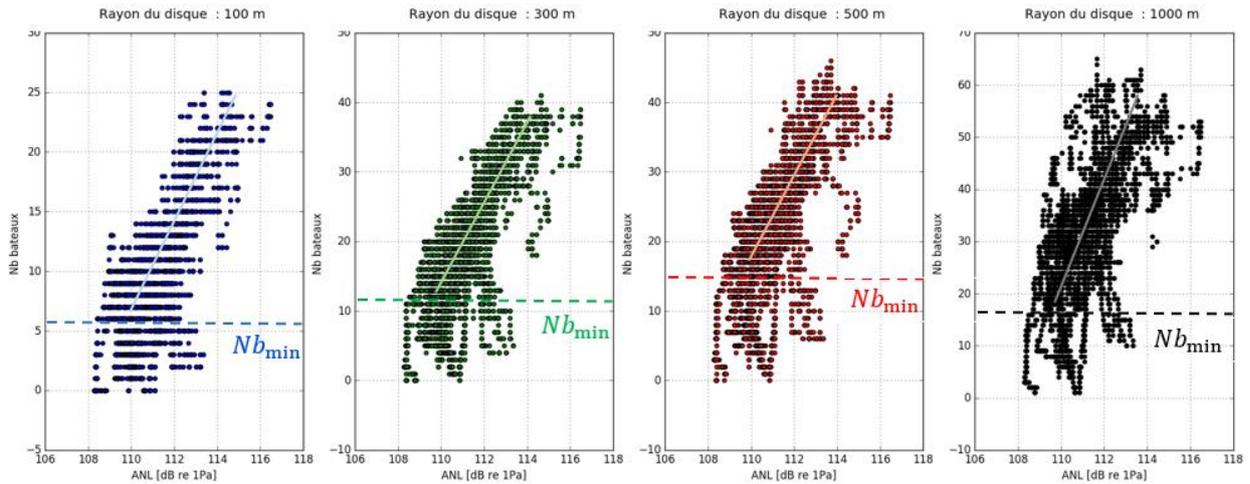


Figure 45 : Niveau ANL en fonction du nombre de bateaux par disque

La Table 15 présente les coefficients de corrélations de Pearson et de Spearman entre l'ANL et le nombre de bateaux, ou le logarithme en base dix du nombre de bateaux, pour l'ensemble des données où lorsque le nombre de bateaux est supérieur aux nombres minimaux. Pour cette bande de fréquence, l'estimation des coefficients de corrélation entre le SPL et le nombre de bateaux présent dans un disque autour du point d'écoute montre un fort lien (coefficient de corrélation compris entre 0,63 et 0,76 - Table 15) et confirme l'observation de [Haxel_2013]. Ce lien entre ces deux paramètres se renforce alors lorsque le nombre minimal de bateau est dépassé (corrélations de Pearson comprise entre 0,76 à 0,8 pour les trois premiers disques). En considérant le logarithme en base dix du nombre de bateaux par zone, les valeurs de corrélation obtenues sont du même ordre, entre 0,75 à 0,78 pour les disques de 100 à 500 m. Les valeurs de corrélation sont maximales pour un disque de 300 m.

Nombre de bateaux présent dans un disque de rayon de	Corrélation avec le nombre de bateaux				
	$Nb_{bateau} \geq 0$		$Nb_{bateau} \geq N_{min}$		
	C_P	C_S	C_S	C_P	
	Nb_{bateau}	Nb_{bateau}	Nb_{bateau} et $\log_{10}(Nb_{bateau})$	Nb_{bateau}	$\log_{10}(Nb_{bateau})$
100 m	0.736	0.639	0.746	0.797	0.776
300 m	0.759	0.733	0.803	0.804	0.787
500 m	0.711	0.718	0.771	0.759	0.749
1000 m	0.626	0.627	0.621	0.622	0.608

Table 15 : Coefficient de corrélation de Pearson et de Spearman entre le niveau ANL estimé dans la bande 100 Hz- 30 kHz et les nombre de bateaux présent dans un disque de 100m à 1000 m

Dans la suite de cette sous-section, nous cherchons à vérifier que l'ANL est liée au logarithme en base dix du nombre de bateaux présents par zone, pour un nombre minimal de bateaux et s'exprime sous la forme :

$$ANL = ANL_0 + k \cdot \log_{10}(N_{si N > N_{min}}) - \quad \text{Équation 18}$$

Une régression linéaire entre l'ANL et le logarithme en base 10 du nombre de bateau permet alors d'estimer les paramètres ANL_0 et k . La Table 16 présente les résultats de cette régression linéaire, ainsi que les coefficients de corrélation de Pearson et de Spearman. Ces coefficients sont supérieurs à 0,6 pour les bandes de tiers d'octave de 125 Hz à 4 kHz dans les disques de 100 m et 1000 m de rayon. Les différences de corrélation observées entre les disques de 100 m à 500 m de rayon sont faibles. En revanche, ces différences s'accroissent lorsque le disque de 1000m est considéré et augmentent lorsque la fréquence augmente. Le maximum du coefficient de corrélation de Spearman de 0,68 à 0,77 est obtenu

pour la bande de tiers d'octave de 2500 Hz. En dehors des bandes de tiers d'octaves de 125 Hz à 5 kHz, la corrélation chute.

Excepté pour le disque de 3000 m de rayon, le coefficient de corrélation augmente lorsque le rayon du disque augmente. Pour l'ensemble des disques étudiées, ce coefficient de pente k augmente aussi en fonction de la fréquence, atteint un maximum pour les bandes de tiers d'octave allant de 160 Hz à 3150 Hz et diminue ensuite. Contrairement au SPL (4.4.2), le maximum du coefficient de pente ne coïncide pas avec le maximum de corrélation : le maximum est alors observé pour les 5 disques pour la bande de tiers d'octave de 200 Hz et est compris entre 12 et 16. Les coefficients de corrélation observés pour la bande de tiers d'octave de 200 Hz sont toutefois proches de ceux observés pour la bande de tiers d'octave de 2500 Hz. Les variations du coefficient k pour les bandes de tiers d'octave ayant les plus forts coefficients de corrélation sont plus marquées que pour le SPL (4.4.2) : k est compris entre 6 et 15 pour un disque de 500 m de rayon. Pour une valeur de k supérieure à 10, il est possible de considérer que le rayon d'écoute porte plus loin que le rayon du disque. En effet, lorsque N bateaux produisant le même niveau source SL sont présents, le niveau atténué est de $SL + 10\log(N)$.

L' ANL_0 présente une évolution différente du SL en fonction de la fréquence. Pour les plages de fréquences où les coefficients de corrélation sont supérieurs à 0.6, l' ANL_0 atteint un maximum local à 400 Hz, diminue jusqu'à 1 kHz et augmente à nouveau. Plus le rayon du disque est faible, plus les niveaux ANL_0 sont forts. La Figure 46 représente le spectre d' ANL_0 et k observé pour les différents disques.

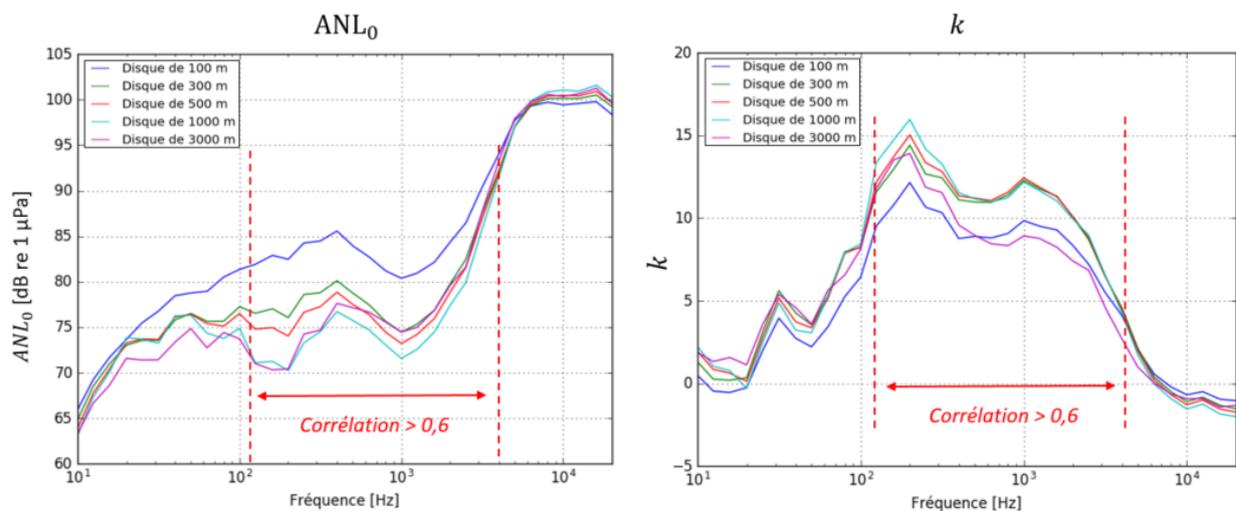


Figure 46 : Spectre ANL_0 (à gauche) et coefficient de pente k (à droite) en fonction de la bande de tiers d'octave pour les différents disques

Bande de tiers d'octave	Disque de rayon 100 m				Disque de rayon 300 m				Disque de rayon 500 m				Disque de rayon 1000 m				Disque de rayon 3000 m			
	C_p	C_s	ANL_0	k																
10 Hz	0,077	0,158	65,9	0,50	0,18	0,232	64,8	1,31	0,25	0,29	63,9	1,94	0,264	0,273	63,2	2,23	0,211	0,207	63,3	1,89
12,5 Hz	-0,047	0,074	69,3	-0,46	0,023	0,119	68,5	0,26	0,072	0,144	67,8	0,85	0,081	0,103	67,3	1,04	0,098	0,125	66,7	1,33
15,75 Hz	-0,046	0,032	71,7	-0,54	0,015	0,083	71,0	0,20	0,044	0,087	70,4	0,63	0,049	0,047	70,1	0,78	0,095	0,083	68,6	1,57
20 Hz	-0,018	0,037	73,7	-0,25	0,021	0,079	73,0	0,34	0,008	0,049	73,3	0,13	-0,015	-0,024	73,8	-0,29	0,056	0,028	71,6	1,13
25 Hz	0,134	0,118	75,5	1,96	0,186	0,162	73,6	3,08	0,154	0,117	73,7	2,74	0,126	0,043	73,7	2,44	0,174	0,116	71,4	3,55
31,5 Hz	0,290	0,299	76,8	3,95	0,364	0,356	73,6	5,62	0,314	0,302	73,7	5,17	0,272	0,214	73,2	4,88	0,284	0,237	71,4	5,39
40 Hz	0,185	0,174	78,5	2,73	0,255	0,237	75,8	4,26	0,208	0,186	76,1	3,73	0,165	0,1	76,3	3,22	0,223	0,16	73,4	4,59
50 Hz	0,178	0,147	78,8	2,22	0,251	0,205	76,5	3,55	0,224	0,176	76,4	3,37	0,187	0,083	76,3	3,06	0,207	0,123	74,9	3,59
63 Hz	0,242	0,257	78,9	3,43	0,333	0,327	75,7	5,31	0,302	0,298	75,4	5,14	0,285	0,226	74,3	5,30	0,287	0,227	72,7	5,64
80 Hz	0,382	0,404	80,5	5,26	0,512	0,517	75,7	7,98	0,474	0,486	75,1	7,88	0,438	0,422	73,8	7,93	0,343	0,321	74,4	6,56
100 Hz	0,494	0,498	81,4	6,43	0,558	0,551	77,3	8,22	0,525	0,519	76,5	8,26	0,492	0,452	74,9	8,44	0,449	0,397	73,7	8,13
125 Hz	0,634	0,639	81,9	9,54	0,683	0,667	76,5	11,60	0,672	0,666	74,8	12,20	0,676	0,67	71,1	13,38	0,565	0,577	71,0	11,81
160 Hz	0,615	0,577	82,9	10,82	0,653	0,637	77,0	12,98	0,647	0,65	75,0	13,73	0,638	0,665	71,3	14,75	0,553	0,569	70,3	13,53
200 Hz	0,662	0,664	82,5	12,15	0,695	0,696	76,1	14,42	0,679	0,699	74,0	15,03	0,662	0,673	70,2	15,97	0,545	0,508	70,4	13,91
250 Hz	0,652	0,650	84,3	10,67	0,686	0,684	78,6	12,67	0,676	0,688	76,6	13,36	0,659	0,668	73,3	14,18	0,522	0,481	74,2	11,87
315 Hz	0,677	0,664	84,5	10,33	0,722	0,738	78,8	12,44	0,696	0,715	77,3	12,82	0,661	0,67	74,5	13,28	0,544	0,507	74,7	11,54
400 Hz	0,632	0,604	85,6	8,76	0,709	0,717	80,1	11,10	0,677	0,679	78,9	11,34	0,633	0,628	76,7	11,54	0,497	0,424	77,6	9,58
500 Hz	0,656	0,630	84,0	8,90	0,716	0,73	78,8	10,98	0,684	0,698	77,5	11,21	0,626	0,621	75,8	11,17	0,475	0,404	77,2	8,96
630 Hz	0,654	0,638	82,7	8,80	0,721	0,744	77,5	10,95	0,682	0,705	76,4	11,07	0,621	0,618	74,7	10,98	0,452	0,386	76,7	8,45
800 Hz	0,632	0,625	81,2	9,07	0,702	0,732	75,7	11,40	0,668	0,699	74,5	11,57	0,595	0,616	73,0	11,24	0,418	0,381	75,6	8,33
1000 Hz	0,661	0,665	80,4	9,85	0,731	0,766	74,5	12,29	0,692	0,737	73,2	12,45	0,622	0,653	71,6	12,18	0,431	0,409	74,5	8,92
1250 Hz	0,662	0,677	80,9	9,51	0,725	0,765	75,3	11,78	0,685	0,736	74,2	11,88	0,617	0,653	72,6	11,66	0,439	0,423	75,0	8,77
1600 Hz	0,652	0,680	82,2	9,28	0,704	0,765	76,9	11,32	0,657	0,735	76,0	11,28	0,589	0,659	74,5	11,03	0,416	0,433	76,9	8,23
2000 Hz	0,663	0,685	84,4	8,35	0,707	0,764	79,8	10,05	0,665	0,744	78,9	10,10	0,601	0,679	77,4	9,96	0,423	0,452	79,6	7,41
2500 Hz	0,655	0,686	86,5	7,21	0,7	0,77	82,5	8,70	0,665	0,76	81,6	8,83	0,62	0,706	79,9	8,97	0,448	0,491	81,6	6,85
3150 Hz	0,647	0,676	90,4	5,51	0,674	0,741	87,5	6,48	0,633	0,728	86,9	6,51	0,587	0,681	85,8	6,58	0,39	0,44	87,7	4,61
4000 Hz	0,626	0,644	94,0	4,11	0,617	0,686	92,2	4,57	0,564	0,66	92,0	4,46	0,497	0,58	91,5	4,29	0,295	0,336	93,3	2,69
5000 Hz	0,506	0,532	97,7	2,06	0,464	0,544	97,0	2,13	0,401	0,514	97,0	1,97	0,323	0,384	97,1	1,73	0,176	0,206	97,9	0,99
6300 Hz	0,16	0,178	99,3	0,57	0,097	0,152	99,4	0,39	0,051	0,135	99,5	0,22	-0,007	0,027	99,9	-0,04	0,006	0,039	99,8	0,03
8000 Hz	-0,06	0,004	99,7	-0,21	-0,126	-0,044	100,1	-0,50	-0,159	-0,123	100,4	-0,68	-0,198	-0,146	100,9	-0,92	-0,13	-0,079	100,6	-0,64
10000 Hz	-0,158	-0,044	99,5	-0,69	-0,222	-0,114	100,1	-1,09	-0,245	-0,123	100,5	-1,29	-0,27	-0,199	101,1	-1,55	-0,203	-0,081	100,4	-0,92
12500 Hz	-0,155	-0,065	99,6	-0,49	-0,229	-0,128	100,1	-0,83	-0,259	-0,15	100,4	-1,00	-0,295	-0,233	100,9	-1,24	-0,155	-0,138	100,7	-0,91
16000 Hz	-0,257	-0,176	99,8	-0,95	-0,315	-0,229	100,5	-1,32	-0,346	-0,261	100,9	-1,55	-0,377	-0,346	101,6	-1,85	-0,275	-0,247	101,3	-1,42
20000 Hz	-0,254	-0,134	98,4	-1,04	-0,328	-0,225	99,3	-1,52	-0,349	-0,245	99,7	-1,73	-0,37	-0,312	100,3	-2,00	-0,232	-0,168	99,6	-1,33
Large bande	C_p	C_s	ANL_0	k																
100Hz-30 kHz	0,600	0,633	108,5	2,97	0,632	0,731	106,9	3,55	0,583	0,717	106,7	3,51	0,538	0,621	106,1	3,52	0,379	0,443	106,9	2,62

Table 16 : Coefficient de corrélation de Pearson C_p , de Spearman C_s , coefficient k et niveau à l'origine de la régression linéaire en base dix du nombre de bateaux pour les disques de 100 m à 3000m.

Cette perte de corrélation en basse fréquence est due à la combinaison de deux propriétés des milieux peu profonds : l'apparition de la fréquence de coupure due à la bathymétrie du site et l'action du vent fortement présent dans la bande 1Hz-100 Hz [Wenz_1962]. En haute fréquence, la contribution du bruit produit par le trafic maritime diminue [Wenz_1962] et le bruit ambiant devient plus sensible aux changements de l'état de la mer. Pour identifier l'impact du vent sur les coefficients de corrélation, les périodes à fort vent sont identifiées en utilisant les données météorologiques du site. Sans ces périodes, le coefficient de corrélation de Pearson augmente significativement en dehors de la bande. Pour un disque de 300m, une augmentation du coefficient de corrélation de Spearman de -0,11 à 0,48 est noté pour la bande de tiers d'octave de 10 kHz (Figure 47). Pour les disques de 100 m à 500 m, les coefficients de corrélation de Pearson et de Spearman deviennent supérieurs à 0,6 entre 20 Hz et 6,3 kHz. Plus le rayon du disque est faible, plus le coefficient de corrélation de Pearson devient élevé.

Corrélation entre l'ANL et \log_{10} du nombre de bateaux présent dans un disque autour de l'enregistreur

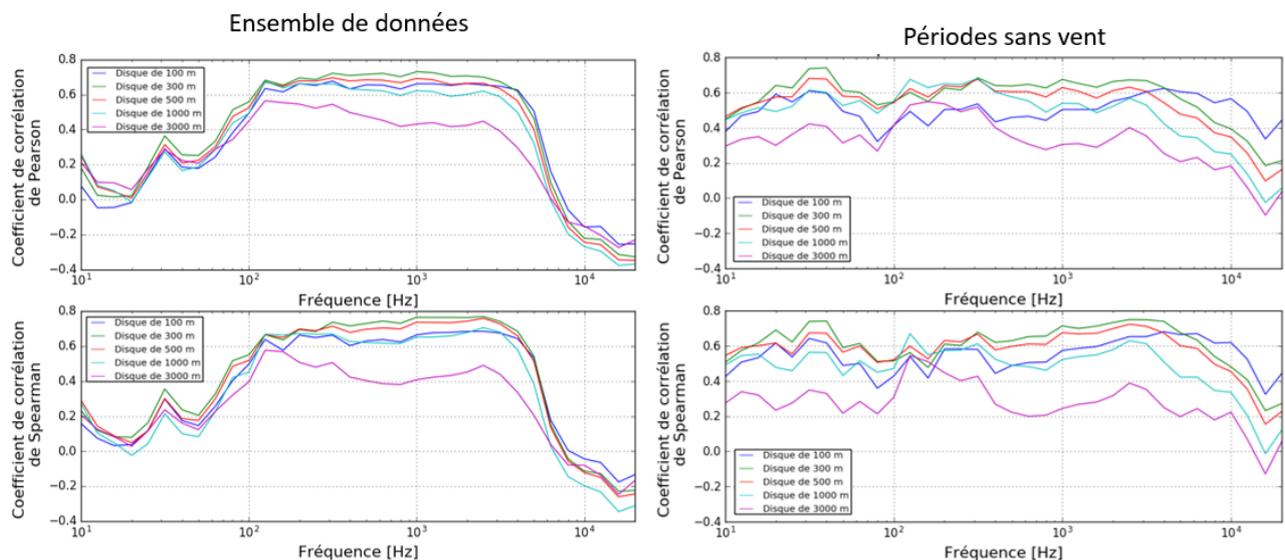


Figure 47 : Corrélation de Pearson (en haut) et de Spearman (en bas) entre l'ANL et le logarithme en base dix du nombre de bateaux en présence (à gauche) et en absence (à droite) des sessions avec vent en fonction des bandes de tiers d'octaves

Pour s'affranchir des effets météorologiques et bathymétriques, ce descripteur acoustique est estimé sur une large bande, la bande 100Hz-30 kHz, et sur la bande de tiers d'octave présentant la corrélation maximale, la bande de tiers d'octave de 2500 Hz. Sur ces deux bandes de fréquences, la distribution de ANL en fonction du logarithme en base dix du nombre de bateaux prend la forme d'un trapèze (Figure 48). La hauteur du trapèze correspond à la dynamique du nombre de bateaux, en échelle logarithmique en base dix, et par conséquent, les côtés parallèles du trapèze correspondent au logarithme en base dix du nombre limite et du nombre maximum de bateaux observé dans la baie. La taille de ces deux côtés reflète la variabilité d'ANL observée. Pour un nombre de bateaux donné, une grande variabilité d'ANL est observée en comparaison de la dynamique globale. L'intervalle interquartile représente 10 à 24% de la dynamique totale. La pente des deux côtés non parallèles caractérise l'évolution d'ANL en fonction du nombre de bateaux.

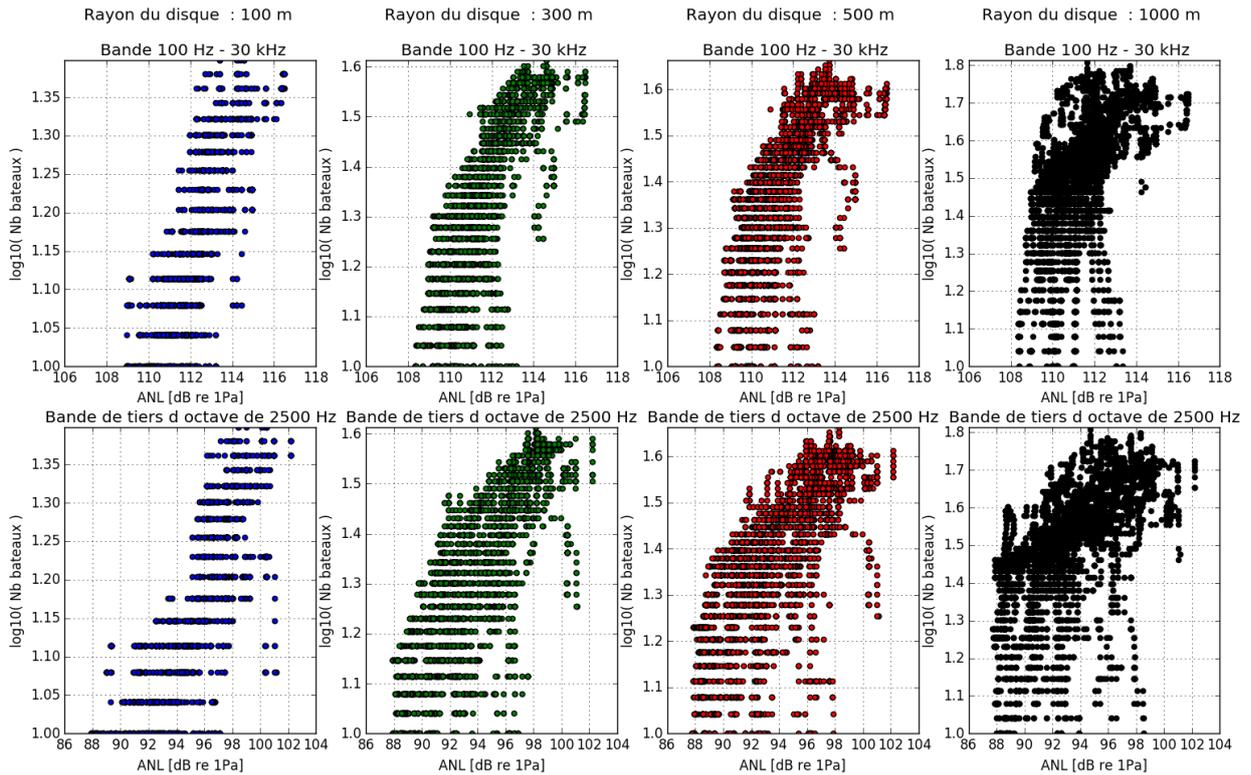


Figure 48 : Représentation de l'ANL en fonction du logarithme en base dix du nombre de bateaux, pour les disques de 100 à 1000m de rayon, et pour les deux bandes considérées : la bande de fréquence 100Hz- 30 kHz (en haut) et bande de tiers d'octave de 2500 Hz (en bas)

Pour chaque disque, des sous-ensembles d'ANL sont créés en considérant un nombre donné de bateaux. Comme précédemment, les valeurs des trois premiers quartiles de chaque sous ensemble d'ANL et de la *whisker*, sont estimées pour chaque sous-ensemble. Ces valeurs évoluent en fonction du nombre de bateaux présents selon une loi logarithmique. Leur régression linéaire permet d'estimer les pentes de ce trapèze. La relation suivante est alors étudiée :

$$ANL_{Q_i,f,R} = ANL_{0Q_i,f,R} + k_{Q_i,f,R} \cdot \log_{10}(N_{si N > N_{min}}) - \quad \text{Équation 19}$$

Avec : Q_i le quartile considéré

Pour la bande de 100Hz-30 kHz, k est comprise entre 8 et 9,2 dans un disque de 100m à 500m, alors que pour la bande de tiers d'octave de 2500 Hz, la pente est comprise entre 14 et 17 (Table 17). Ce coefficient k dépend de la valeur statistique étudiée et du rayon du disque. Le coefficient augmente avec le rayon jusqu'à 500m. Il est cependant difficile d'estimer une loi reliant ce coefficient au quartile et au rayon du disque. Une augmentation du coefficient de corrélation est observée. Maximal pour un disque de rayon de 300 m, ce coefficient est plus faible lorsque l'on considère le *whisker*, et est supérieur à 0,90 pour les autres valeurs statistiques. D'un point de vue global, l'ANL large bande est assimilable à une loi d'environ $10 \cdot \log_{10}(N_{si N > N_{min}})$ et l'ANL dans la bande de tiers d'octave de 2500 Hz est assimilable à une loi supérieure à $10 \cdot \log_{10}(N_{si N > N_{min}})$.

		Bande 100 Hz – 30 kHz				Bande de tiers d'octave de 2500 Hz			
		$k_{Q_i,f,R}$	$ANL_{0_{Q_i,f,R}}$	C_P	Valeur à N_{min}	$k_{Q_i,f,R}$	$ANL_{0_{Q_i,f,R}}$	C_P	Valeur à N_{min}
Disque de rayon 100m	Q1	8,27	102,3	0,969	108,7	17,34	74,4	0,971	87,9
	Q2	7,94	103,2	0,955	109,4	16,29	76,8	0,963	89,5
	Q3	8,50	103,3	0,904	109,9	14,93	79,5	0,937	91,1
	Whisker	8,84	104,8	0,735	111,7	11,32	87,1	0,752	96,0
Disque de rayon 300m	Q1	9,11	99,0	0,959	108,8	18,39	68,2	0,969	88,1
	Q2	8,62	100,1	0,961	109,4	17,08	71,1	0,977	89,6
	Q3	8,74	100,4	0,952	109,8	14,26	76,2	0,967	91,6
	Whisker	8,18	102,5	0,848	111,4	8,07	88,2	0,693	96,9
Disque de rayon 500m	Q1	9,32	97,9	0,976	108,9	20,40	63,9	0,973	87,9
	Q2	9,04	98,8	0,975	109,5	19,76	65,9	0,973	89,1
	Q3	9,19	99,2	0,918	110,0	17,23	70,8	0,938	91,1
	Whisker	8,98	101,1	0,718	111,8	12,47	81,1	0,677	95,7
Disque de rayon 1000m	Q1	6,50	100,7	0,900	108,9	17,60	65,0	0,947	87,0
	Q2	6,85	100,9	0,902	109,5	15,88	69,0	0,943	89,0
	Q3	6,94	101,4	0,904	110,1	15,13	71,7	0,928	90,7
	Whisker	7,60	102,5	0,744	112,0	11,44	81,7	0,650	96,1

Table 17 : Coefficient de corrélation de Pearson, $ANL_{0_{Q_i,f,R}}$ et de pente $k_{Q_i,f,R}$ obtenu par régressions linéaires des valeurs quartiles de l'ANL en fonction du logarithme du nombre de bateaux pour la bande 100Hz-30 kHz et la bande de tiers d'octave de 2500 Hz.

Avec une étude réalisée sur seulement 5 disques, l'estimation de la portée du descripteur acoustique ANL est moins précise. L'analyse précédente à montrer que :

- Le coefficient de corrélation de Pearson entre l'ANL et l'indicateur du trafic maritime supérieur à 0,75 pour les 3 premiers disques, de 0,6 pour le disque à 1000 m et est maximum pour un disque de 300 m.
- Le coefficient de régression linéaire des valeurs statistiques est supérieur à 0,8 jusqu'à une distance de 500 m et maximum pour une distance de 300m.

Il est donc possible de conclure que ce descripteur ANL permet d'apporter des informations sur le trafic maritime et de dénombrer le nombre de bateaux jusqu'à une distance de 500m, et pour une distance optimale de 300m.

4.4.5 Solutions paramétriques simples reliant l'ANL et le nombre de bateaux

Dans cette thèse, l'aspect modélisation fait référence à deux objectifs. Dans un contexte de modélisation du bruit émis par le trafic maritime, la connaissance du trafic maritime doit permettre d'estimer les niveaux acoustiques. A l'inverse, dans un contexte d'étude des activités humaines, l'estimation des descripteurs acoustiques doit permettre d'avoir une description du trafic présent. La Table 17 correspondant à la régression linéaire entre l'ANL et le logarithme du nombre de bateaux permettent alors de définir des lois paramétriques simples et empiriques entre ces deux indicateurs. Ces lois sont définies par une valeur moyenne (correspondant à la valeur médiane issue de la Table 17) et un intervalle d'incertitude (liée à la valeur de l'intervalle interquartile). Leurs formules génériques sont présentées dans l'Annexe 2. Ces équations sont valables seulement durant la journée.

$$ANL(R, Nb_{bateau}) = ANL_{med}(R, Nb_{bateau}) +/ - ANL_{IQR}(R, Nb_{bateau}) - \text{modèle 1} - \text{Équation 20}$$

$$Nb_{bateau}(R, ANL) = Nb_{bateau_{med}}(R, ANL) +/ - Nb_{bateau_{IQR}}(R, ANL) - \text{modèle 2} - \text{Équation 21}$$

En considérant le disque de 300m et la bande de fréquence de 100Hz à 30kHz, l'ANL et le nombre de bateaux modélisée durant la journée peuvent être décrites par les formules suivantes :

$$ANL(Nb_{bateau}) = 100,13 + 8,62 \cdot \log_{10}(\max(Nb_{bateau}, 12)) +/ - 1,4 + 0,37 \cdot \log_{10}(\max(Nb_{bateau}, 12)) -$$

Équation 22

$$Nb_{bateau}(ANL) = \begin{cases} \text{si } ANL > 109,4 & 10^{\frac{ANL-100,13}{8,62}} +/ - \left(10^{\frac{ANL-99,0}{9,11}} - 10^{\frac{ANL-100,43}{8,74}} \right) \\ \text{si } ANL \leq 109,4 & 6 +/ - 6 \end{cases} - \text{Équation 23}$$

La Figure 49 représente les distributions de l'ANL en fonction du nombre de bateaux auxquelles sont superposées :

- Les courbes du modèle d'estimation de l'ANL en fonction du nombre de bateaux présent dans le disque d'écoute, ainsi que l'intervalle d'incertitude (*modèle 1*),
- Les courbes du modèle d'estimation du nombre de bateaux présent dans un disque d'écoute en fonction de l'ANL, ainsi que l'intervalle d'incertitude (*modèle 2*).

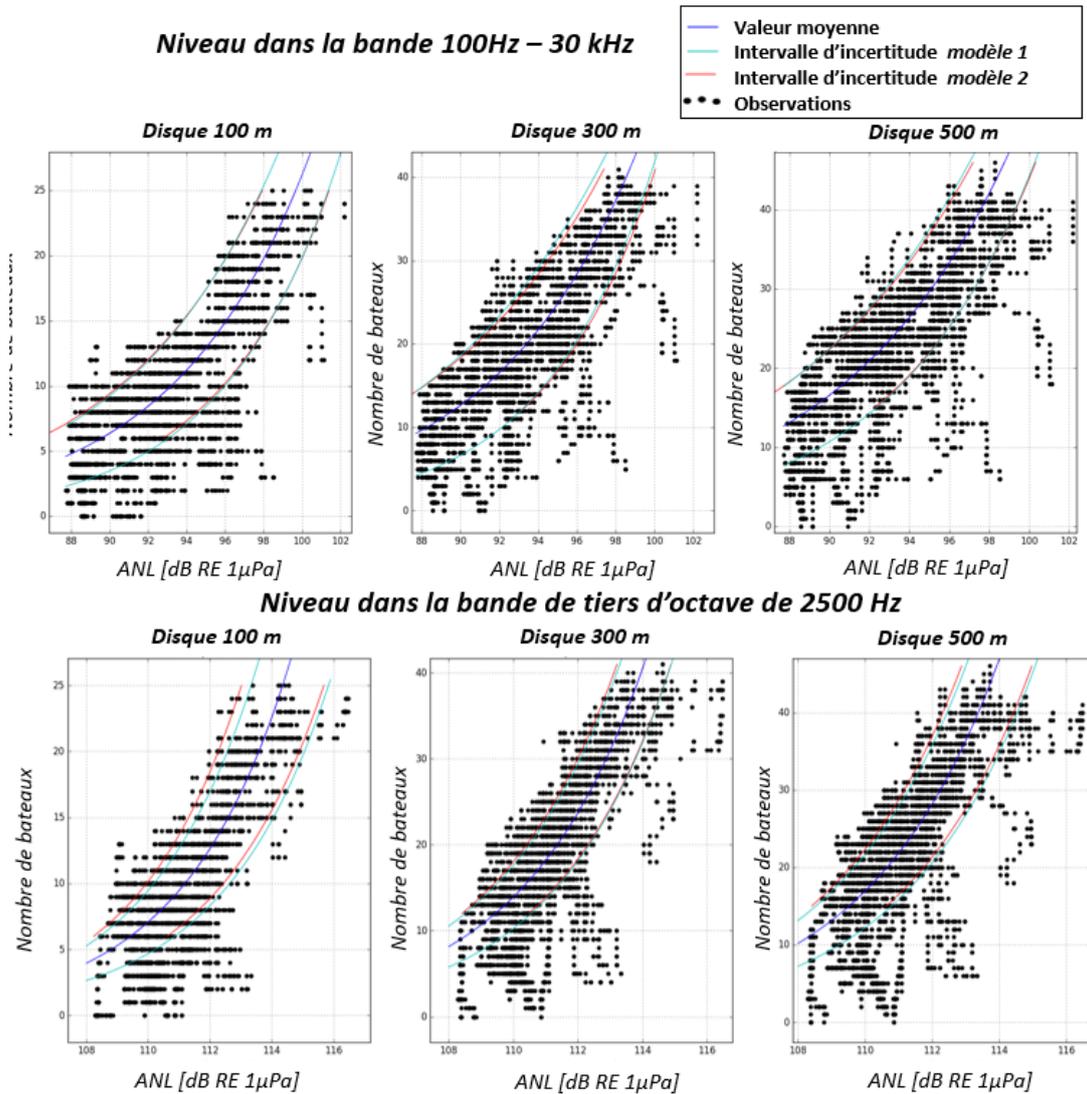


Figure 49 : Affichage des observations d'ANL en fonction du nombre de bateaux et des lois définissant la valeur médiane et l'intervalle pour la bande de fréquence de 100 Hz à 30 kHz (en haut) et la bande de tiers d'octave de 2500 Hz (en bas)

La Table 18 présente le pourcentage de variance des observations expliquées pour ces lois.

Pourcentage de variance des observations expliquées pour ces lois			
Loi : ANL en fonction du nombre de bateaux dans un disque d'écoute - <i>modèle 1</i>			
Bandes de fréquence	Disque de 100 m de rayon	Disque de 300 m de rayon	Disque de 500 m de rayon
Large bande 100 Hz- 30 kHz	80.7 %	73.9 %	77.5 %
Bande de tiers d'octave 2500 Hz	80.3 %	82.2 %	78.7 %
Loi : Nombre de bateaux dans un disque d'écoute en fonction de l'ANL - <i>modèle 2</i>			
Bandes de fréquence	Disque de 100 m de rayon	Disque de 300 m de rayon	Disque de 500 m de rayon
Large bande 100 Hz- 30 kHz	59,7%	59,4%	64,4%
Bande de tiers d'octave 2500 Hz	69,2 %	75,1%	66,9%

Table 18 : Pourcentage de variance des observations expliquées pour les deux lois modélisant l'ANL et le nombre de bateaux

La loi définissant l'ANL en fonction du nombre de bateaux (*modèle 1*) est plus stable lorsque l'on considère la bande de fréquence 100Hz-30 kHz. Cette stabilité est définie en termes de largeur maximale et de variations de la largeur de l'intervalle d'incertitude en fonction du nombre de bateaux (Table 19).

	Rayon du disque	Bande de 100Hz-30kHz	Bande de tiers d'octave de 2500 Hz
Largeur de l'intervalle d'incertitude	100 m	< à 2,8 dB - 35,0 % de la dynamique totale	< à 4,5 dB - 33,3 % de la dynamique totale
	300 m et 500 m	< 2,2 dB - 27,5 % de la dynamique totale	< 6,3 dB - 46,7 % de la dynamique totale
Variation de l'intervalle d'incertitude en fonction du nombre de bateaux	100 m à 500 m	Faible : 0,13 à 0,36 dB 5,9 % à 12,8 % de la largeur de l'intervalle	Forte : 2,3 à 4 dB 51,4 % à 63 % de la largeur de l'intervalle

Table 19 : Largeur maximale et variation de la largeur de l'intervalle d'incertitude du modèle paramétrique caractérisant l'ANL en fonction du nombre de bateaux

Pour les trois premiers disques, la loi caractérisant le nombre de bateaux en fonction de l'ANL (*modèle 2*) permet d'expliquer 59,6 à 75,1 % des variations d'ANL obtenues pour le niveau large bande. Ce pourcentage augmente alors de 72,5 à 76,5 % (large bande) et 79,8 à 83,4 % (bande de tiers d'octave) pour le sous-ensemble dont le nombre de bateaux est supérieur aux nombres limites N_{min} . Contrairement au *modèle 1*, le *modèle 2* permet de définir moins finement le nombre de bateaux en fonction de l'ANL. La largeur de l'intervalle d'incertitude augmente lorsque l'ANL et les rayons du disque augmentent et deviennent conséquentes pour de fortes variations d'ANL (Table 20 – ligne 1). Cette finesse de l'intervalle d'incertitude est ajustable par modification de la formule générique. La réduction de l'intervalle d'incertitude est alors réalisable par multiplication de ce terme par un coefficient : $c \cdot Nb_{bateau}(R, ANL) = Nb_{bateau_{med}}(R, ANL) +/ - c \cdot Nb_{bateau_{QR}}(R, ANL)$ (Équation 24). Les lois expliquent alors au moins la moitié des observations pour un coefficient de 0,7 (Table 20).

Coefficient c	Largeur de l'intervalle pour un ANL		Pourcentage d'observations en accord avec la loi	
	112,4 dB	114,4 dB	$Nb_{bateau} > 0$	$Nb_{bateau} > N_{min}$
1	9 à 17 bateaux	17 à 26 bateaux	59,6 à 64,4 %	72,5 à 76,5 %
0,9	8 à 15 bateaux	15 à 24 bateaux	54,5 à 60,7 %	67,4 à 72,0 %
0,8	7 à 13 bateaux	14 à 21 bateaux	50,4 à 57,1 %	62,9 à 68,0 %
0,7	6 à 11 bateaux	12 à 19 bateaux	45,6 à 52,5 %	56,5 à 62,2 %
0,6	5 à 10 bateaux	11 à 16 bateaux	39,8 à 46,8 %	49,5 à 56,3 %
0,5	4 à 8 bateaux	9 à 13 bateaux	32,9 à 40,5 %	41 à 48,8 %

Table 20 : Evolution en fonction du coefficient c, pour un disque de rayon 100 m et de rayon 500 m et pour la bande 100 Hz -30 kHz, de la largeur de l'intervalle d'incertitude, pour un niveau ANL supérieur à 3 et 5 dB par rapport au niveau minimale, et du pourcentage d'observation en accord avec la loi, pour l'ensemble des échantillons et pour les échantillon ayant un nombre de bateau supérieur au nombre minimal, du modèle paramétriques caractérisant le nombre de bateau en fonction de l'ANL.

4.5 Discussion

4.5.1 Une étude spécifique à la baie de Calvi, non généralisable à l'ensemble des environnements côtiers

Cette étude permet d'identifier le trafic maritime enregistré à proximité de la pointe de la Revellata dans la baie de Calvi et propose une méthode permettant de caractériser les bruits rayonnés par le trafic maritime dans un environnement côtier. Ainsi les descripteurs acoustiques sont reliés à des indicateurs du trafic maritime. Cette étude n'a été réalisée que sur un seul site et les résultats présentés ne peuvent être généralisés à l'ensemble des milieux côtiers. Toutefois, la méthodologie proposée pour l'étude reste généralisable pour l'ensemble des environnements côtiers. De même, les outils développés non spécifique à ce site peuvent être appliqués dans d'autres études.

4.5.2 DCSMM : des indicateurs peu adaptés au suivi d'une zone côtière

L'union européenne, à travers le descripteur 11 de la *Directive Cadre pour la Stratégie pour le Milieu Marin* DCSMM définit comme indicateur des pollutions sonores des habitats marins pour les sources continues, un suivi sur une année du niveau *rms* dans les bandes de tiers d'octave de 63 et 125 Hz [EuropeanCommission_2010]. Les niveaux observés dans ces deux bandes de tiers d'octave sont corrélés au trafic maritime : les coefficients de corrélation de Pearson et de Spearman sont compris entre -0,28 et -0,39, pour la relation reliant le niveau SPL et la distance au plus proche, et entre 0,3 et 0,68, pour la relation reliant le niveau ANL et le nombre de bateaux présents dans un disque de 300 m. Cette corrélation est plus forte pour les bandes de tiers d'octave de 125 Hz [Hermannsen_2014, Merchant_2014] et augmente pour les bandes de tiers d'octaves plus hautes. Ainsi, les coefficients de corrélation entre les descripteurs acoustiques et les indicateurs du trafic maritime sont, comme dans l'étude de [Merchant_2014] plus importants pour la bande de 250 Hz et 500 Hz, mais contrairement à l'étude de [Hermannsen_2014], moins importants dans la bande de tiers d'octave de 10 kHz.

Dans le cas présent, ces coefficients de corrélation sont maximaux pour la bande de tiers d'octave de 1250 Hz, dans le cas du niveau SPL, et dans la bande de tiers d'octave de 2500 Hz dans le cas de l'ANL. De même, l'analyse du niveau large bande permet une bonne correspondance entre les niveaux acoustiques et des indicateurs du trafic maritime. De plus, les indicateurs DCSMM étudiés sur une longue période d'écoute sont fortement sujets à la variation induite par les changements météorologiques. Les corrélations entre les niveaux ANL et le nombre de bateaux présents autour de l'enregistreur sont plus importants lorsque les conditions climatiques sont favorables et diminuent lorsque l'état de mer se dégrade. Cette diminution est plus marquée et devient conséquente pour la bande de tiers d'octave de 63 Hz. Cette étude propose alors une méthode pour déterminer les critères pour le suivi du bruit ambiant dans les milieux côtiers. L'étude de l'analyse le niveau large bande, complémentaires aux indicateurs fournis par la DCSMM, semble davantage correspondre au milieu hauturier.

4.5.3 Un modèle paramétrique simple mais limité permettant un suivi acoustique des environnements côtier et l'évaluation de la tendance générale sur le trafic maritime

Les liens entre les niveaux SPL et ANL peuvent être réalisés à l'aide de modèles de propagation [Erbe_2012, Gervaise_2015]. Ces modèles sont ensuite alimentés par les données AIS qui permettent de localiser le bateau, d'identifier le type de navire et sa vitesse de déplacement. Ces informations permettent ensuite d'estimer un modèle statistique de bruits rayonnés par chaque embarcation et de le propager dans la baie. L'utilisation de ces modèles nécessite une bonne connaissance de la bathymétrie du site. Ainsi, l'application de ces modèles dans des zones côtières pour du suivi de bruit rayonné par le trafic maritime laisse apparaître quelques difficultés. Les informations sur les bateaux (type et vitesse) ne peuvent pas être obtenues en utilisant les seules données AIS.

Les modèles de bruits rayonnés présents dans la littérature sont réalisés pour de grandes embarcations alors que la flottille présente dans la baie de Calvi est majoritairement composée de petites embarcations allant à différentes allures. Les zones côtières sont à bathymétries complexes, parfois mal connues par les personnes gérant ces zones.

Un premier modèle paramétrique simple permettant d'estimer le niveau SPL en fonction de la distance du bateau a été mis en place (Annexe 2 :). Cette solution permet de définir une valeur moyenne de SPL et un intervalle d'incertitude en fonction d'une probabilité de correspondance avec les observations. Toutefois, en raison de la forte variabilité des niveaux sources et du phénomène de masquage par le bruit ambiant, l'information apportée par cette solution simple est peu pertinente.

Le deuxième modèle paramétrique simple permet de relier l'ANL au nombre de bateaux. Ce modèle permet alors de relier le niveau ANL avec le nombre de bateaux en expliquant un fort pourcentage de la variance. Ces modèles sont toutefois limités en termes d'applications. En effet, ce modèle ne permet pas d'estimer précisément le nombre de bateaux dans une zone en fonction d'ANL (largeur de l'intervalle d'incertitude de 17 à 24 bateaux pour un disque de 500 m de rayon) et ainsi ne convient pas pour des applications de défense et de surveillance précise du trafic. De plus, expliquant 80 % de la variance, l'estimation de l'ANL en fonction du nombre de bateaux ne permet pas d'identifier les valeurs extrêmes prises par l'ANL. Par ailleurs, ce modèle ne prend pas en compte le type et la vitesse du bateau. Ainsi, en cas de changement conséquent dans la répartition par type de navires, les valeurs statistiques estimées par ce modèle ne permettront plus d'expliquer le même pourcentage de variance. En revanche, ce modèle est simple à mettre en œuvre pour les non acousticiens comme les gestionnaires d'aires marines. Cette solution est alors une première approche permettant de répondre au besoin d'un suivi du bruit ambiant et d'estimation des tendances générales sur le trafic maritime dans les zones côtières.

4.6 Conclusion

Ce chapitre propose une méthode applicable à tout site côtier permettant de caractériser l'influence du trafic maritime sur le bruit sous-marin à travers deux indicateurs acoustiques. Ces descripteurs acoustiques traduisent la dualité entre les sources individualisables et l'étude du bruit ambiant indépendant de ces sources individualisables. Les résultats obtenus dans la baie de Calvi sont présentés. La Figure 50 présente une synthèse de ce chapitre.

Le paysage acoustique est caractérisé par deux descripteurs acoustiques estimés sur des durées d'écoute différentes. Une période courte d'écoute permet de caractériser individuellement les embarcations composant la flottille présente dans la baie, alors qu'une période d'écoute longue permet de lisser ces individualités et d'obtenir des informations sur le trafic maritime global.

Le premier descripteur, le SPL, est estimé sur une durée d'écoute courte : 10 secondes. Ce descripteur renseigne sur la distance du bateau le plus proche de l'enregistreur dans un rayon d'écoute de 450 m, et plus particulièrement au logarithme en base dix de cette distance. L'analyse par bande de tiers d'octave montre que ce lien est plus important pour les bandes de tiers d'octave allant de 200 Hz à 3150 Hz : la limite en basse fréquence correspond alors à la fréquence de coupure induite par la bathymétrie du site alors que la fréquence haute de cette bande est liée à la différence entre la durée d'intégration et la largeur des miroirs de Lloyd's. L'étude large bande, entre 100 Hz et 30 kHz, permet alors de devenir moins dépendant du site d'étude et d'obtenir des résultats de corrélation proches des résultats obtenus pour la bande de tiers d'octave de 1250 Hz.

Le deuxième descripteur est le niveau ANL et correspond au pied de bruit sur une période d'une heure des niveaux SPL estimés sur 60 secondes. Ce descripteur acoustique renseigne sur le logarithme en base dix du nombre de bateaux présents dans un disque de moins de 500 m autour de l'enregistreur, et à une distance d'écoute optimale de 300 m. Un nombre minimum de bateaux, dépend du rayon d'écoute, est alors nécessaire pour provoquer des variations du niveau ANL. La corrélation entre l'ANL et cet indicateur du trafic maritime est plus importante dans la bande de fréquence 125 Hz et 4 kHz, et optimale pour la bande de tiers d'octave de 2500 Hz. Hors de cette bande de fréquence, ce descripteur acoustique est particulièrement sensible au changement d'état de mer. L'analyse du niveau large bande, entre 100 Hz et 30 kHz, présente des résultats de corrélation proches de ceux obtenus lors de l'analyse sur la bande de tiers d'octave optimale.

Les résultats de cette analyse permettent alors de créer des modèles paramétriques simples permettant de relier l'ANL au nombre de bateaux présents dans un disque autour du point d'écoute. Ces modèles sont plus stables dans le cas de l'étude large bande. Le modèle permettant d'estimer l'ANL en fonction du nombre de bateaux permet d'expliquer de 74 à 80 % de la variance des observations, en fonction du rayon d'écoute considéré 100 m ou 500 m. L'intervalle d'incertitude est de 2,2 dB, soit 27,5 % de la dynamique totale. Cet intervalle d'incertitude est plus important pour le second modèle qui permet d'estimer le nombre de bateaux en fonction de l'ANL : cet intervalle représente +/- 8,5 à 12 bateaux, en fonction du rayon d'écoute considéré 100 m ou 500 m. Ce modèle explique 72,5 à 76,5 % de la variance des observations.

Caractérisation du trafic maritime

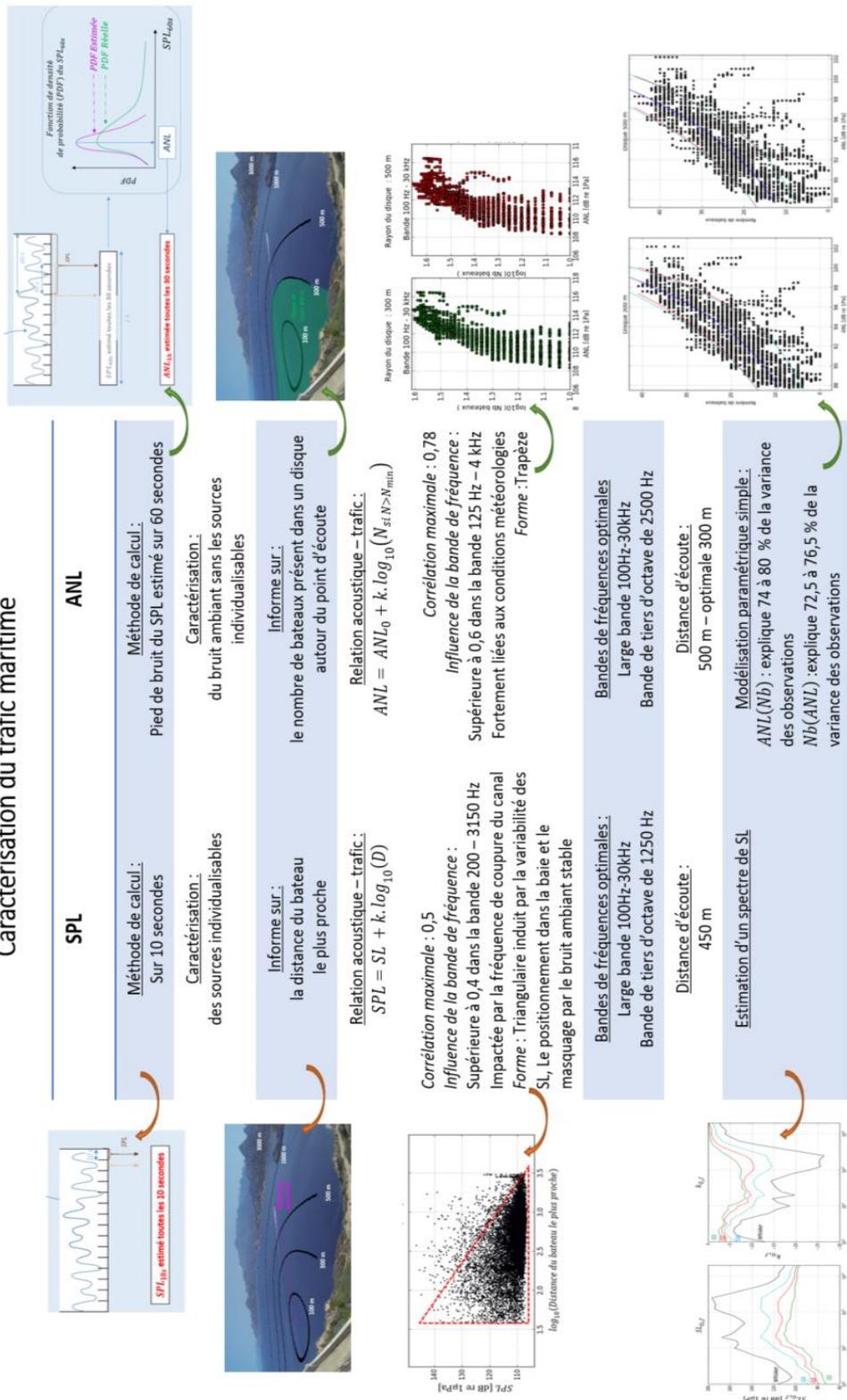


Figure 50 : Synthèse sur l'influence du trafic maritime sur le bruit sous-marin

5 Chapitre 5 : Impact du trafic maritime sur le budget acoustique de la baie de la Revellata

Sommaire

5	Chapitre 5 : Impact du trafic maritime sur le budget acoustique de la baie de la Revellata	101
5.1	Introduction.....	102
5.2	Méthode de suivi des paysage acoustiques : Etat de l’art	103
5.3	Méthode d’évaluation des variabilités spatio-temporelles du paysage acoustique.....	104
5.3.1	Les descripteurs acoustiques.....	104
5.3.2	Définition des périodes d’études	104
5.3.3	Définition de la méthode d’analyse	105
5.4	Etude des variabilités spatio-temporelles du paysage acoustique de la baie.....	105
5.4.1	La variabilité diurne – nocturne du paysage acoustique.....	106
5.4.2	La variabilité saisonnière du paysage acoustique	109
5.4.3	La variabilité spatiale du paysage acoustique durant la saison estivale	110
5.4.4	La variabilité journalière durant la saison estivale	113
5.5	Discussion	115
5.5.1	La variabilité liée à la production sonore biologique	115
5.5.2	Le choix des indicateurs acoustiques pour le suivi d’une zone côtière.....	115
5.5.3	La limite de l’étude liée au choix des descripteurs acoustiques	116
5.6	Conclusion	117

5.1 Introduction

Dans plusieurs zones de globe, des études ont montré que la présence du trafic maritime modifiait le paysage acoustique et que sa croissance provoquait sur le long terme une augmentation des niveaux ambiants [Andrew_2011, Kinda_2013a]. La baie de Calvi devient durant la saison estivale une place privilégiée pour les activités nautiques de loisir et de plaisance : plus de 550 passages de bateaux sont recensés durant la journée, lorsque les conditions météorologiques sont favorables. Au regard de la forte augmentation du trafic maritime durant la saison estivale, il est possible de se demander *dans quelle mesure le trafic maritime estival diurne modifie le paysage acoustique de la baie durant l'été*. Le chapitre précédent a démontré la possibilité de caractériser différents aspects du paysage acoustique par deux descripteurs acoustiques et d'identifier l'influence du trafic maritime avec ces deux descripteurs. Selon la définition de NRC 1995, le bruit est caractérisé par deux descripteurs acoustiques : le SPL associé au bruit océanique et caractérisant les sources individualisables et l'ANL associé au bruit de fond, caractérisant le niveau ambiant en effaçant toute source individualisable sous deux aspects différents. Ces deux descripteurs permettent alors de caractériser l'influence du trafic maritime sur le paysage acoustique. De plus, trois éléments de réponse concernant la modification du paysage acoustique par le trafic estival diurne sont apportés par l'analyse visuelle du trafic maritime présenté dans le chapitre 3 :

- Le trafic maritime étant quasi-exclusivement présent durant la journée, une différence entre la nuit et le jour est attendue.
- Le trafic maritime durant la journée évolue au rythme des plaisanciers : faible lors de la pause repas et aux horaires les plus matinales et les plus tardives, il atteint son apogée en milieu de matinée et milieu d'après-midi.
- Le trafic maritime dans la baie n'est pas uniforme, différentes routes sont observables.

Ces éléments de réponse apportent une précision concernant le questionnement général de ce chapitre et interrogent sur les variations diurne / nocturne, spatiales et temporelles des descripteurs acoustiques du paysage acoustique de la baie, sur deux échelles temporelles : l'échelle journalière et l'échelle saisonnière. Les quatre questions directrices de cette étude découlent de ces observations :

- *Quelle est la modification observée des descripteurs acoustiques du paysage acoustique entre la nuit et le jour ?*
- *Comment évoluent les descripteurs acoustiques du paysage acoustique durant les saisons ?*
- *Quelle est l'évolution journalière des descripteurs acoustiques du paysage acoustique ?*
- *Quelle est l'évolution des descripteurs acoustiques du paysage acoustique de la baie en fonction de la position géographique par rapport au trafic maritime ?*

Le chapitre est divisé en cinq sections. Un état de l'art sur les méthodes employées pour le suivi des paysages acoustiques est présenté dans la deuxième section. Une présentation de la méthode choisie dans cette thèse est développée dans la troisième section. Les descripteurs acoustiques correspondront à ceux présentés dans le chapitre présent. Les distributions observées durant les nuits et les jours sont comparées en utilisant différentes méthodes : la comparaison des moyennes, médianes et des fonctions de répartition. L'évolution journalière du trafic maritime est analysée en comparaison à un niveau de référence estimé durant les périodes « de moindre bruit ». La quatrième section présente alors les résultats de cette étude. La base de données utilisée est alors composée d'enregistrements réalisés à deux positions différentes durant trois saisons. Les données sont comparées en utilisant différentes combinaisons, permettant ainsi l'étude des variabilités diurne / nocturne, spatiales et des variabilités temporelles sur deux échelles : l'échelle journalière et l'échelle saisonnière. Ces résultats sont ensuite discutés dans la cinquième section.

5.2 Méthode de suivi des paysage acoustiques : Etat de l'art

Dans la communauté d'acoustique sous-marine, le suivi temporel et la caractérisation sont abordés en utilisant différentes méthodes complémentaires. Dans un premier temps, ce suivi peut être simplement réalisé à l'aide d'analyse visuelle reposant sur la comparaison de spectrogrammes, le suivi dans le temps [Staaterman_2013, Lillis_2014, Erbe_2015, Sánchez-Gendriz_2016] ou à l'aide de la superposition des densités spectrales de puissance [McWilliam_2013, Lillis_2014, Butler_2016]. Cette méthode permet alors d'identifier rapidement les variabilités les plus marquées et d'identifier l'origine de ces variabilités : présence saisonnière de mammifères marins, présence d'un trafic diurne. En fonction de l'aspect étudié, le paysage acoustique est alors caractérisé par différents paramètres acoustiques tels que le niveau SPL sur différentes bandes d'écoute [Merchant_2014, Sánchez-Gendriz_2016] et le niveau des densités spectrales de puissance pour l'ensemble des fréquences [Gervaise_2012b, Erbe_2015] pour l'étude du bruit rayonné de bateaux. Pour l'étude des populations benthiques, l'indice *Acoustic Complexity Index* [Pieretti_2011, McWilliam_2013, Tower_2013], l'indice *Acoustic Diversity Index* [Sueur_2008, McWilliam_2013] ou le kurtosis [Henderson_2012, Hawkins_2017] sont utilisés. Une comparaison des distributions de ces paramètres acoustiques est alors effectuée en fonction des périodes d'enregistrement (saisonnière, nocturne/ diurne) ou du lieu d'acquisition. Un premier élément de suivi du paysage acoustique consiste en la comparaison des distributions à un seuil de référence : [Gervaise_2012b] compare les densités spectrales de puissance avec le seuil d'audition des mammifères marins et [Simard_2016b] estime le pourcentage du temps où l'ANL de 6 dB un seuil de référence.

L'utilisation de tests statistiques permet de comparer les distributions entre elles. Différents tests déterminant l'homogénéité entre deux groupes indépendants sont utilisés dans la littérature. L'analyse par variance, permet alors de comparer la moyenne de deux distributions normales soumis à l'indépendance des échantillons. Pour les distributions de type gaussiennes, le test ANOVA [McWilliam_2013] est utilisé. En cas de non normalité des distributions, cette analyse par variance est réalisée à l'aide d'une version non paramétrique du test : le test de Kruskal-Wallis [Tonolla_2011, Staaterman_2013, Parkes_2014]. D'autres tests statistiques peuvent aussi tester l'indépendance des deux distributions. Ainsi, le test non paramétrique de Kolmogorov-Smirnov [Stephens_1974, Lillis_2014] permet de vérifier l'hypothèse selon laquelle les deux échantillons sont issus d'une population différente et le test non paramétrique U de Mann Whitney [Tonolla_2011, Buscaino_2016] teste les différences de position, en termes de moyenne et de rangs moyens, de deux échantillons. Ces méthodes non paramétriques sont plus adaptées lorsque le nombre d'échantillons est inférieur à 100.

La comparaison des distributions est aussi réalisée par l'étude des moments statistiques tels que l'estimation des niveaux moyens [Erbe_2015, Sánchez-Gendriz_2016] et la déviation standard [Gervaise_2012b]. L'étude de ces moments peut aussi se traduire par l'estimation d'une sélection de centiles choisis tel que le 10^{ème} et 90^{ème} centile pour [Haxel_2013, Buscaino_2016] ou par l'affichage du niveau pour chaque centile [Erbe_2015]. L'affichage des densités spectrales de puissance associées à différentes valeurs de centiles est couramment utilisé [Merchant_2015, Sánchez-Gendriz_2016]. L'utilisation de diagrammes quantile-quantile [Miksis-Olds_2011] permet alors de comparer une distribution à une loi standard, ou de comparer l'adéquation de deux distributions. A l'échelle du quartile, l'affichage par box plot permettant alors de visualiser ces moments et d'estimer en particulier le niveau médian [Lillis_2014, Sánchez-Gendriz_2016, Erbe_2016].

La répartition des données de la distribution est aussi analysée par étude de l'histogramme [Tonolla_2011], où par l'estimation des fonctions de densité de probabilité [Gervaise_2012b, Merchant_2016] et des fonctions de densité cumulée du descripteur acoustique [Gervaise_2012b, Erbe_2016]. Ces descripteurs acoustiques évoluant en fonction des fréquences, plusieurs outils de

visualisation ont été développés pour faciliter cette analyse multidimensionnelle. [Merchant_2013, Erbe_2016] propose une visualisation tridimensionnelle renseignant sur la densité de probabilité de la densité spectrale de puissance, en fonction de la fréquence. L’aspect temporel est pris en compte par [Simard_2016b], qui propose une visualisation quadridimensionnelle du paysage acoustique sous forme de cube présentant la fonction de densité cumulée de la densité spectrale de puissance en fonction des fréquences et du temps.

Ce problème pluridimensionnel peut être résolu en utilisant une analyse par composante principale, ACP. Ainsi, [Guan_2015] caractérise la variabilité temporelle d’un paysage acoustique en fonction de l’instant de la journée, des saisons et de la bande de fréquence étudiée et [Lossent_2017] démontre la variabilité spatiale des productions benthiques en fonction du type d’habitat.

5.3 Méthode d’évaluation des variabilités spatio-temporelles du paysage acoustique

5.3.1 Les descripteurs acoustiques

Les descripteurs acoustiques utilisés durant cette étude correspondront aux descripteurs acoustiques présentés dans le chapitre précédent (Table 21).

Descripteur acoustiques	Niveau acoustique	Temps d’écoute	Bandes de fréquence	Correspondance avec le trafic maritime
Etude sur une courte durée d’écoute	SPL	10 secondes	Bande 100 Hz – 30 kHz Bande de tiers d’octave de 1250 Hz	Logarithme en base dix de la distance du bateau le plus proche
Etude sur une longue durée d’écoute	ANL (pied de bruit du SPL 60s)	1 heure	Bande 100 Hz – 30 kHz Bande de tiers d’octave de 2500 Hz	Logarithme en base de dix du nombre de bateaux dans un disque de 500 m

Table 21: Descripteurs acoustiques

5.3.2 Définition des périodes d’études

La description du paysage acoustique a mis en évidence l’alternance diurne / nocturne. Pour s’affranchir des variations saisonnières, [Buscaino_2016] choisit une séparation diurne / nocturne évolutive en fonction de la saison. [Guan_2015] adopte une séparation de la journée en 4 périodes de durée égale : le lever du soleil, le jour, le coucher du soleil et la nuit. Dans cette thèse, une journée de 24 heures sera alors divisée en deux parties, le jour et la nuit comprises entre le lever et le coucher du soleil. La Figure 51 présente les heures délimitant ces périodes.

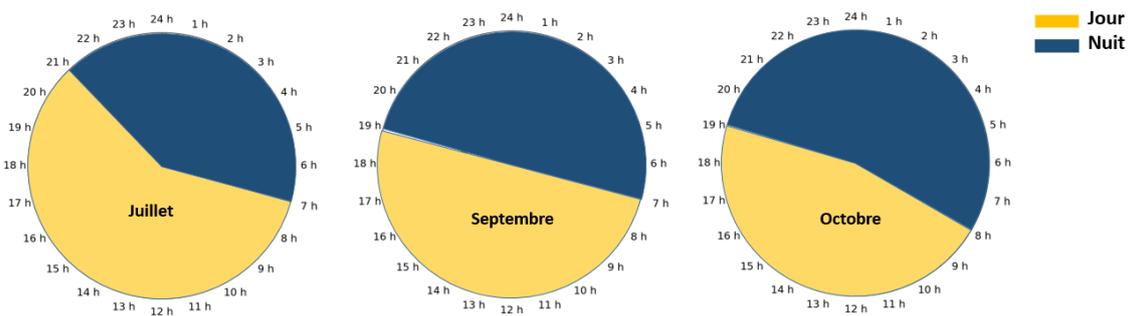


Figure 51 : Séparation évolutive en fonction des saisons des périodes correspondant au jour (jaune) et à la nuit (bleu).

5.3.3 Définition de la méthode d'analyse

L'analyse de la distribution des descripteurs acoustiques sera réalisée en considérant plusieurs points :

- La comparaison des distributions entre elles avec un test statistique : le test ANOVA. Lorsque la p value résultant de ce test est inférieure à 0.05, l'hypothèse que les deux distributions partagent la même moyenne est rejetée.
- L'estimation des fonctions de densité de probabilité de chaque distribution permettant de représenter la loi de probabilité associée aux distributions de SPL et d'ANL, pour une la largeur de l'intervalle d'étude est de 0,06 dB.
- La caractérisation de chaque distribution par quatre niveaux : le niveau médian, le niveau moyen, le niveau le plus probable et le kurtosis. Le kurtosis est une mesure indirecte de l'aplatissement d'une distribution : plus le coefficient est élevé, plus l'aplatissement est faible. Cette caractérisation permet alors de quantifier les variations de niveau global.
- Estimé pour les niveaux SPL, le SEL reflète le niveau cumulé observé sur une période et ramené à une seconde.
- L'analyse des fonctions de répartition : les niveaux de chaque centile allant du 1^{er} au 99^{ème} sont estimés. Cette analyse permet alors d'observer les variabilités des valeurs extrêmes. Cette analyse est renforcée en analysant le diagramme quantile-quantile sur lequel est affiché la droite obtenue lors de la régression linéaire des valeurs entre le 1^{er} quartile et le 3^{ème} quartile.
- La comparaison des distributions diurnes et nocturnes avec le niveau de référence (estimé durant les périodes de moindre bruit) : les pourcentages de dépassement par rapport à 6 seuils prédéfinis sont estimés. Ces seuils correspondent alors à un dépassement du niveau de référence de 0 dB, 3 dB, 5 dB, 10 dB, 15 dB et 20 dB.
- L'évolution journalière des dépassements des niveaux références : pour chaque session de 10 minutes, les pourcentages cumulés de dépassement des 6 seuils de référence sont estimés. Un dépassement de 70 % correspondant alors à un dépassement de 7 minutes.

5.4 Etude des variabilités spatio-temporelles du paysage acoustique de la baie

La base de données acoustique *BDD Acoustique* utilisée pour cette étude est composée de 4 enregistrements réalisés à 3 saisons différentes et à deux emplacements différents (2.3.1 - p 37). Les différentes combinaisons des données permettent d'étudier la variabilité du paysage acoustique sous différents aspects spatiaux et temporels.

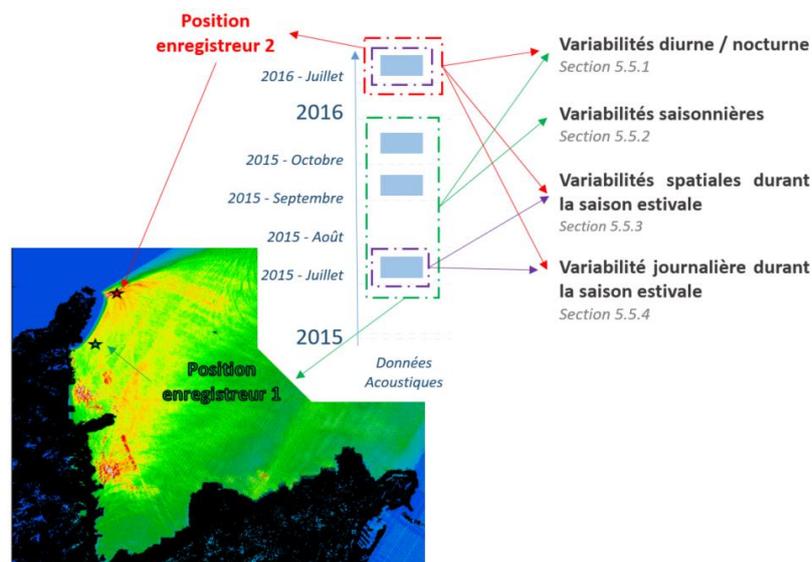


Figure 52 : Etude des variabilités spatio-temporelles du paysage acoustique

La Table 22 représente, pour l'ensemble des descripteurs acoustiques et des sessions d'enregistrement, l'estimation de la valeur moyenne, de la médiane et la plus probable, le kurtosis, le jour et la nuit. Ces résultats seront exploités dans les sections suivantes.

Descripteurs	Valeur dB re 1 μ Pa	Position 1 proche du trafic		Position 2 loin du trafic					
		Juillet		Juillet		Septembre		Octobre	
		Jour	Nuit	Jour	Nuit	Jour	Nuit	Jour	Nuit
SPL 100 Hz – 30 kHz	moyenne	112.3	111.7	108.5	110.8	107.3	110.0	105.7	108.5
	médiane	110.4	111.4	107.4	110.6	106.6	110.1	105.2	108.7
	la plus probable	109.3	110.6	106.4	110.2	105.9	110.2	105.0	109.1
	SEL cumulé	114.8	111.9	109.6	111.0	108.2	110.1	106.4	108.6
	Kurtosis (non en dB)	5.6	20.5	12.7	12.4	18.4	3	15.2	8.5
SPL bande de tiers d'octave de 1250 Hz	moyenne	89.6	81.9	85.1	83.5	84.8	81.7	86.2	82.4
	médiane	87.3	81.3	83.2	83.1	84.1	81.5	85.8	81.5
	la plus probable	82.8	80.7	80.3	81.0	81.6	79.8	79.6	75.3
	SEL cumulé	95.7	83.3	89.1	84.1	88.7	84.8	87.1	82.4
	Kurtosis (non en dB)	0.5	19.6	6.3	10.9	11.3	0.3	1.6	-0.9
ANL 100 Hz – 30 kHz	moyenne	111.2	111.6	107.6	110.8	106.7	110.3	105.3	108.6
	médiane	110.9	111.4	107.3	110.5	106.2	110.2	105.2	108.8
	la plus probable	110.1	110.2	106.7	110.1	105.9	110.2	105.0	109.2
	Kurtosis (non en dB)	0.5	-1	8.2	1.1	2.8	-0.7	0.6	0.5
ANL bande de tiers d'octave de 2500 Hz	moyenne	93.0	91.1	94.9	98.0	90.2	92.3	89.9	91.4
	médiane	92.4	91.2	94.7	98.0	90.1	92.2	89.3	91.2
	la plus probable	90.6	90.7	94.2	98.1	90.1	92.1	88.3	91.4
	Kurtosis (non en dB)	-0.2	-0.6	7.7	0.9	2.6	-0.7	-0.2	0

Table 22 : Niveau moyen, médian et le plus probable pour les distributions correspondant au jour et à la nuit, pour les 4 sessions d'enregistrement et pour les 4 descripteurs acoustiques

5.4.1 La variabilité diurne – nocturne du paysage acoustique

La Figure 53 présente un spectrogramme des enregistrements de Juillet 2016. Ce spectrogramme permet de visualiser le signal de 0 à 10 kHz sur 8 jours d'enregistrement. L'alternance diurne / nocturne est aisément identifiable sur cette figure. Durant la journée, les bruits générés par le trafic maritime provoquent l'apparition de lignes verticales fortement énergétiques et de courte durée. Chaque ligne correspond à un bateau ayant un bruit rayonné élevé, c'est-à-dire, les petites et moyennes embarcations passant à proximité de l'enregistreur à vitesse élevée. A l'inverse, le trafic étant peu présent durant la nuit, peu de lignes verticales fortement énergétiques sont observées. Il est toutefois à noter durant la nuit, l'apparition d'un bruit homogène de 200 Hz à 1,5 KHz. Cette production sonore correspond à l'activité nocturne des poissons et est particulièrement présente à la tombée et au lever du soleil [Erbe_2015, Coquereau_2015, Parmentier_2016, Lossent_2017, Di Iorio_2018]. Hors de cette période nocturne de fortes activités biologiques, le paysage acoustique reflète les conditions naturelles du milieu : non anthropisé, absence de trafic maritime, et une activité biologique normale [Kinda_2013a, Mathias_2016].

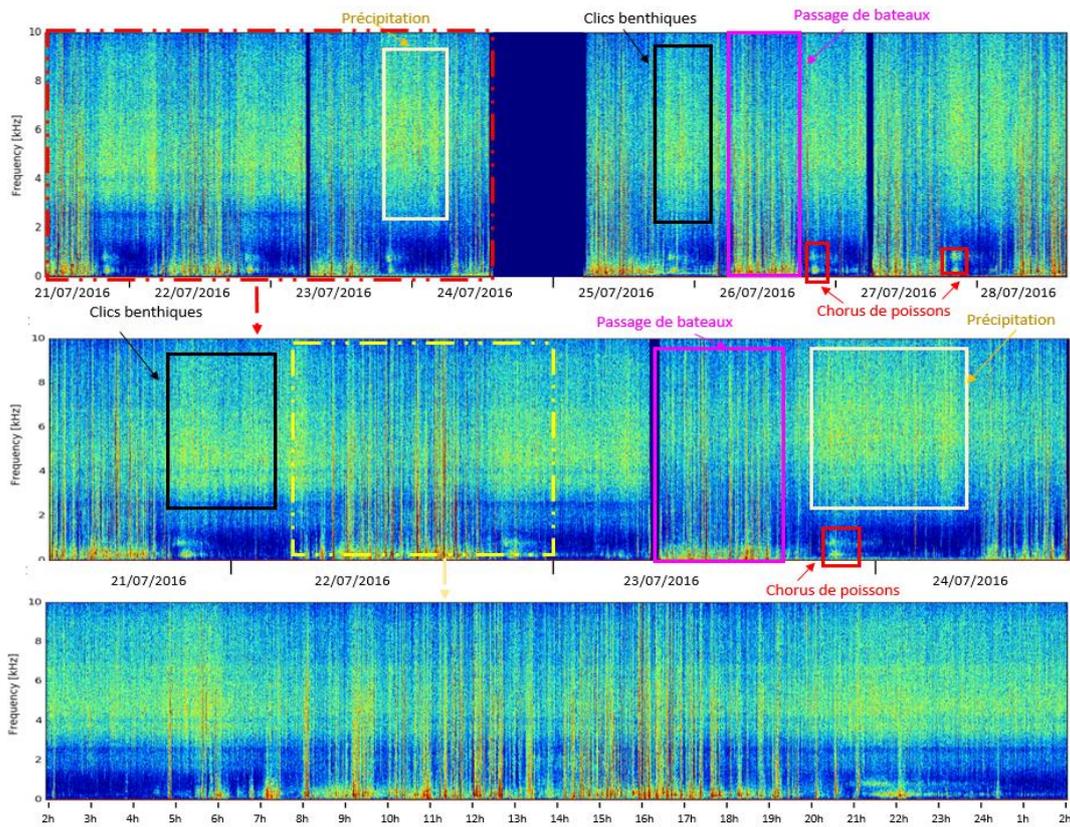


Figure 53 : Spectrogramme durant la saison estivale, au plus proche du trafic maritime

D'un point de vue générale, cette alternance diurne / nocturne est observable pour l'ensemble des sessions principalement lors de l'analyse des valeurs extrêmes, et est confirmée par ANOVA (les p values comprises entre 10^{-6} et 10^{-239}) et par l'affichage par QQ-plot (pente de 0.18 à 0.92). Les passages de bateaux augmentent fortement et temporairement les niveaux SPL, et créent des augmentations fluctuantes du niveau ANL en fonction du nombre de bateaux. Cette variabilité s'exprime différemment en fonction de la proximité par rapport au trafic maritime. Parallèlement, l'activité nocturne des poissons est un facteur non négligeable qui modèle le paysage acoustique de la baie. L'augmentation du trafic maritime diurne tend alors à réduire les différences diurne / nocturne, voire à les inverser. **Au plus proche du trafic maritime, l'analyse des niveaux moyennes, médians et les plus probables ne permettent pas de d'observer cette variabilité diurne / nocturne** : les différences observées sont inférieures à 2.5 dB. Ainsi, la contribution du bruit généré par le trafic maritime se traduit durant la journée par :

- **Des niveaux plus importants pour les valeurs de centiles élevés.** La Table 23 présente la différence maximum pour chaque descripteur acoustique, ainsi que le centile à partir duquel les distributions sont plus importantes durant la journée.
- **Une augmentation du nombre de valeurs extrêmes** : sur l'affichage du diagramme quantile-quantile, la courbe s'éloigne de la droite issue de la régression linéaire entre le 1^{er} et 3^{ème} quartile pour des valeurs extrêmes de quantiles (Figure 54).
- **Un aplatissement de la distribution plus marqué pour le SPL durant la journée, et pour l'ANL durant la nuit** (Table 22).
- **Le SEL cumulé sur l'ensemble des journées est plus important que le SEL cumulé sur l'ensemble des nuits** (Table 22).

Les différences de niveaux moyennes, médians et les plus probables deviennent plus marqués lorsque l'on s'éloigne du trafic maritime. Les valeurs moyennes, médianes et les plus probables sont plus

faibles durant la journée : une différence comprise entre 1,43 et 4,5 dB (Table 22). **Les niveaux de centiles sont plus faibles durant la journée que durant la nuit**, jusqu'au 91^{ème} centile pour le niveau SPL dans la bande 100 Hz – 30 kHz et pour l'ensemble des centiles pour deux niveaux ANL (Table 23). Les différences maximales entre la nuit et le jour sont comprises entre 2 et 3.5 dB pour l'ANL ainsi que 5 et 8 dB pour le SPL. Les distributions nocturnes ont un aplatissement plus marqué que les distributions diurnes (Table 22).

Concernant les descripteurs acoustiques sélectionnée dans le chapitre 4, une **divergence fortement marquée des résultats pour le SPL dans la bande de tiers d'octave 1250 Hz est observable pour l'ensemble de l'étude** et se caractérise par :

- Des valeurs moyennes, médianes et les plus probables plus importantes durant la journée.
- Des niveaux observés durant la journée plus importante que ceux observés durant la nuit, à partir du 45^{ème} centile où pour l'ensemble des centiles.
- La courbe quantile-quantile est en dessous de régression linéaire ente le 1^{er} et 3^{ème} quartile pour les centiles élevés (Figure 54).

Descripteurs		Proche trafic		Loin du trafic	
		Juillet	Juillet	Septembre	Octobre
SPL	Différence maximale J- N	14.3 dB	8.2 dB	8.5 dB	5.1 dB
100 Hz – 30 kHz	Centile Jour > Nuit	69	92	94	95
SPL tiers d'octave de 1250 Hz	Différence maximale J- N	21.6 dB	16.3 dB	12.9 dB	6.8 dB
	Centile Jour > Nuit	1	48	0	0
ANL	Différence maximale J- N	2 dB	-1.9 dB	-0.4 dB	-0.5 dB
100 Hz – 30 kHz	Centile Jour > Nuit	90	-	-	-
ANL tiers d'octave de 2500 Hz	Différence maximale J- N	8.2 dB	-1.2 dB	-0.3 dB	-0.2 dB
	Centile Jour > Nuit	35	-	-	-

Table 23 : Différences entre aux fonctions de répartitions du jour et de la nuit

Saison estivale – au plus proche du trafic maritime

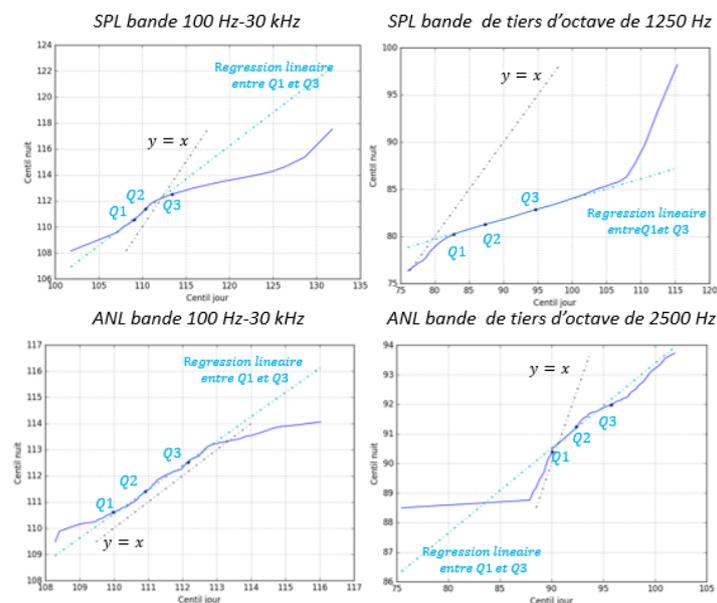


Figure 54 : Diagramme quantile-quantile au plus proche du trafic maritime (juillet 2016)

5.4.2 La variabilité saisonnière du paysage acoustique

L'analyse montre une variabilité saisonnière nocturne non induite par le trafic maritime, confirmée par le teste ANOVA (p value comprise entre 0 et 10^{-273}). Ainsi, lorsque l'on s'éloigne de la saison estivale, cette variabilité saisonnière se traduit par :

- **Une diminution des niveaux associés à chaque centile.** Les niveaux observés en Juillet sont supérieurs de septembre (à partir du 11^{ème} centile) et d'octobre dès le premier centile (Figure 55). Les différences maximales observées sont alors de 4 à 7 dB pour l'ANL et de 3.6 dB pour le SPL.
- **Une diminution du nombre de valeurs extrêmes.** L'affichage de QQ-plot montre un fort écart des valeurs extrêmes de quantile par rapport à la droite issue de la régression linéaire ente le 1^{er} et 3^{ème} quartile.
- **Une uniformisation temporelle du rythme biologique nocturne.** Durant la saison estivale, la production sonore se caractérise par la présence de deux pics d'activité benthique et ichtyologique au lever et au coucher du soleil. En octobre, la rupture induite par entre les deux pics d'activité est moins marquée : l'activité biologique augmente à la tombée de la nuit, diminue faiblement mais reste conséquente avant d'a nouveau augmenter au lever du soleil.

La variabilité saisonnière est observable en journée et est confirmée par ANOVA (p value comprise entre 10^{-3} et 10^{-178}). La variabilité induite par le changement de saison se traduit par une variation des valeurs extrêmes. Ainsi, lorsque l'on s'écarte de la saison touristique, on observe :

- **Une diminution des niveaux associés à chaque centile,** les niveaux observés en juillet sont supérieurs à ceux de septembre à octobre. Les différences de niveaux observées entre juillet et octobre aux 99^{ème} centiles sont de 6,1 à 8,7 dB, pour les niveaux SPL, et 2,4 à 5,5 dB pour les niveaux ANL (Table 22).
- **Une diminution du nombre de valeurs extrêmes** traduit par :
 - L'affichage quantile-quantile montre que les valeurs extrêmes, aussi bien faibles que fortes, s'écartent de la droite issue de la régression linéaire ente le 1^{er} et le 3^{ème} quartile.
 - **Un raccourcissement de la « queue » des fonctions de densité de probabilité.** Les distributions observées durant la journée sont uni-modales de type Lévy (distribution gaussienne avec un allongement de la partie à droite). Lorsque l'on s'écarte de la saison touristique, la fonction de densité de probabilité diminue plus rapidement lorsque l'on s'écarte de son maximum.
- **Une diminution du SEL cumulé durant la journée.**

Inférieures à 2.5 dB, les variations intra-nocturnes, intra-diurnes et entre les distributions nocturnes et diurnes des niveaux moyens, médians et les plus probables diurnes ne permettent pas conclure sur la variabilité saisonnière et l'influence du trafic maritime. Une forte **diminution de ces niveaux pour l'ANL dans la bande de tiers d'octave de 2500 Hz** est observée : perte entre Juillet et Octobre entre 6.6 et 7.2 dB en nocturne et entre 5 à 6.6 dB en diurne (Table 22). Une **divergence fortement marquée des résultats pour le SPL dans la bande de tiers d'octave 1250 Hz est observable** et se caractérise par :

- Des valeurs de centiles supérieures durant la nuit en octobre à celles observées en juillet de 59^{ème} au 85^{ème} centile, et à partir du 48^{ème} centile pour celles observées en septembre.
- Des valeurs de centiles durant la journée plus importantes en juillet seulement à partir du 68^{ème} centile (septembre) et du 90^{ème} centile (octobre).

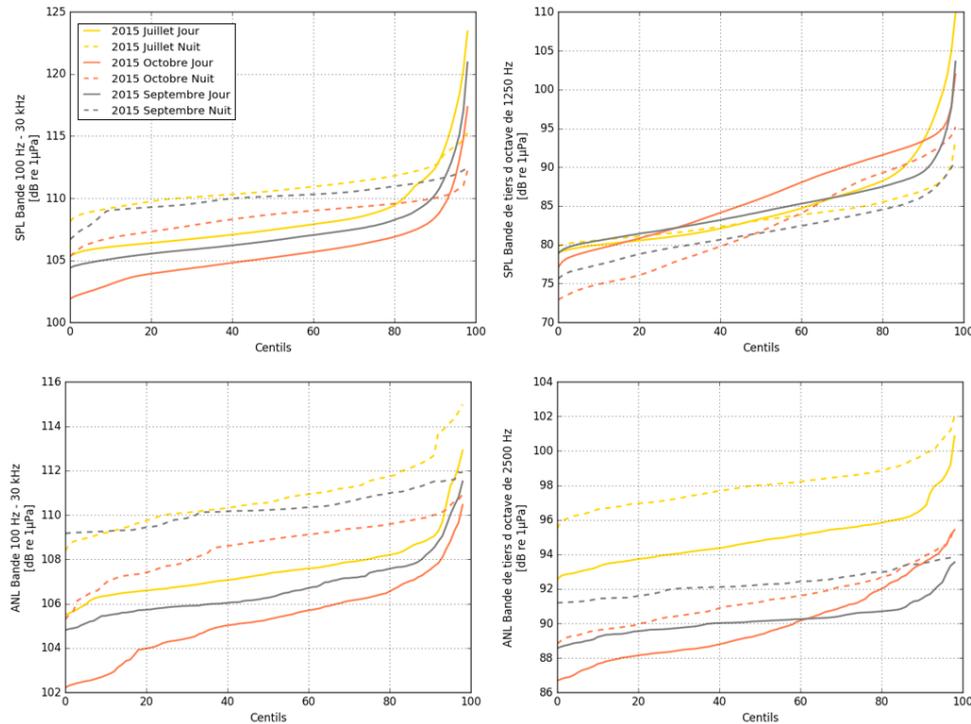


Figure 55: Fonctions de répartition durant le jour (trait plein) et durant la nuit (trait en pointillée) en fonction des variations saisonnières : juillet 2015 (jaune), septembre 2015 (Gris) et octobre 2015 (Orange)

5.4.3 La variabilité spatiale du paysage acoustique durant la saison estivale

Les données utilisées pour cette section ont été enregistrées à deux positions différentes : une à proximité de la pointe de la Revellata et une à proximité de Stareso. Le trafic à proximité de la Revellata représente alors 40 % du trafic de la baie, et est composé des bateaux parcourant les routes « Revellata-Citadelle », « Revellata-Oscelluccia » et « Revellata-Alga ». Ainsi, la position à proximité de la Revellata permet d'entendre principalement la route « Revellata-Oscelluccia » et les bateaux avec un fort niveau source parcourant la route « Revellata-Alga ». La position à proximité de Stareso est donc plus éloignée du trafic maritime. Cet éloignement est confirmé par l'analyse de la carte du trafic maritime obtenue par traitement d'images GoPro. Le nombre moyen de détections, par heure et par pixel, pour l'ensemble de la session, à 100 m et 450 m autour de chaque position est de 0,98 et 0,61 dans le cas de l'enregistreur présent à la pointe de la Revellata. Il est de 0,47 et 0,44 pour l'enregistreur présent à proximité de la Stareso. Les données utilisées pour l'étude des variabilités spatiales de la baie n'ont pas été acquises en simultanément. En revanche, la surveillance du trafic maritime a montré que le trafic maritime était constant entre les deux années. A heure de suivi de la baie égale, durant les journées à conditions climatiques favorables, 520 à 550 passages de bateaux ont été annotés en 2015 (position loin du trafic maritime), contre 450 à 550 passages de bateaux en 2016 (position proche du trafic maritime). Les conditions météorologiques sont légèrement plus favorables pour les enregistrements de 2016. Le vent établi est en moyenne de 4.5 nœuds +/- 2.4 nœuds, en 2016 et de 5 nœuds +/- 1.9 nœuds.

Durant la nuit, de faibles variations des niveaux médians, moyens et les plus probables sont observés. Les niveaux ANL et SPL observés dans la bande 100 Hz-30 kHz diminuent lorsque l'on s'écarte du trafic maritime, alors que **les niveaux dans les deux bandes de tiers d'octave augmentent** (Table 22). Ces observations se retrouvent lors de l'analyse des niveaux par centiles : à partir du 90^{ème} ou 95^{ème} centile, **pour les deux bandes de tiers d'octave, les niveaux observés pour la position la plus éloignée sont supérieurs à ceux observés pour une position proche du trafic maritime et inversement**

pour les deux niveaux large bande. Ce comportement antagoniste suggère une modification de l'activité sonore en basse fréquences à différentes positions de la baie.

Les distributions diurnes diffèrent en fonction de la position de la baie : la p value du test ANOVA est comprise entre 10^{-39} et 0 et l'affichage du QQ-plot montre une pente comprise entre 1.6 et 3.2. Ces variations ne peuvent être exclusivement attribuées à la variabilité spatiale naturelle observée durant la nocturne. Durant la journée, **une diminution des niveaux médians, moyens et les plus probables est observée lorsque l'on s'écarte du trafic maritime** de 2 à 3,8 dB (variation plus conséquente que les variations nocturnes). Cette variabilité spatiale se traduit principalement en termes de **variation des valeurs extrêmes** et est induite, pour le niveau SPL, par la distance des bateaux lors de leur passage au plus proche et le type de bateau, pour le niveau ANL, par la combinaison entre la distance des bateaux et le nombre de bateaux passant dans le disque d'écoute. Pour la position la plus éloignée du trafic maritime, on observe par rapport à la position la moins éloignée :

- **De fort écart entre la valeur le plus probable et les valeurs moyennes sont observés pour la position la plus proche du trafic** et s'amointrissent lors de l'éloignement géographique.
- **Des niveaux de centiles moins importants, dès le 1^{er} centile pour le niveau dans la bande 100 Hz-30 kHz et à partir du 6^{ème} centile pour le niveau SPL dans la bande de tiers d'octave de 1250 Hz.** La différence de niveau augmente lorsque l'indice du centile augmente et est maximale entre le 86^{ème} et le 98^{ème} centile. Ce maximum est compris entre 8 et 10 dB pour les niveaux SPL et est de 5,5 dB pour le niveau ANL (Table 22).
- **Une augmentation du SEL cumulé durant la journée.**
- **Un aplatissement de la distribution pour les fortes valeurs de centiles extrêmes :**
 - L'affichage quantile-quantile indique une dissymétrie entre les distributions : les données sont alignées jusqu'à une certaine valeur, puis présentent une concavité tournée vers le bas.
 - **Un raccourcissement de la « queue » des fonctions de densité de probabilité.** Les distributions observées durant la journée sont uni-modales de type Lévy (distribution gaussienne avec un allongement de la partie à droite) dont le coefficient « c » est plus faible pour les distributions au plus loin du trafic maritime. Ainsi, au plus loin du trafic maritime, la fonction de densité de probabilité diminue plus rapidement lorsque l'on s'écarte de son maximum. La probabilité associée au maximum est plus importante pour la position la plus éloigné du trafic maritime
 - **Les kurtosis des distributions au plus proche du trafic sont plus faibles** (Table 22).

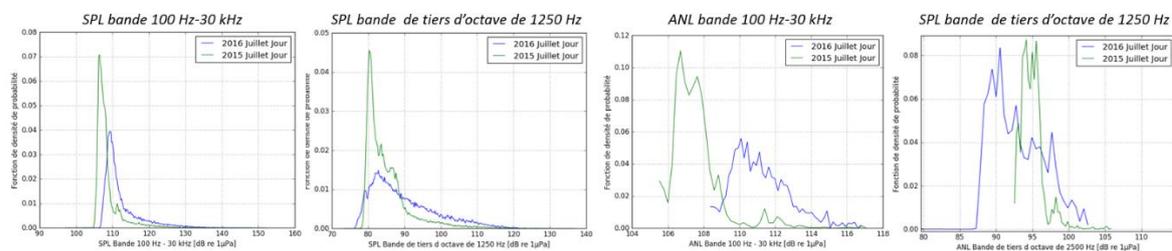


Figure 56 : Fonction de densité de probabilité diurne en Juillet 2016 (bleu) et Juillet 2015 (vert)

L'analyse de l'ANL dans la bande de tiers d'octave de 2500 Hz montre des résultats en contradiction avec les autres descripteurs. Ayant une moyenne et médiane plus importante en 2015 de nuit comme de jour, les valeurs de centiles diurnes sont plus importantes en 2015 jusqu'au 72^{ème} centile (différences maximales de 4,7 dB en dessous du 72^{ème} centile et de 1,8 dB au-dessus). Cette différence

s'explique par le contexte du site. La position au plus loin du trafic maritime est située à l'intérieur de la baie et permet d'entendre l'activité benthique émis par l'ensemble de la côte. A l'inverse, pour la position la plus éloigné du trafic maritime, seul l'activité benthique associée à la pointe de la Revellata semble être entendue. **Présentant pourtant un maximum de corrélation avec le trafic maritime, cet indicateur montre aussi une fortement dépendance avec l'activité.**

De même, la bande 1250 Hz, qui était pourtant la bande la plus adaptée pour l'étude du trafic maritime en 2016, semble être moins adaptée en 2015. La différence de bathymétrie peut engendrer des différences de fréquence de coupure.

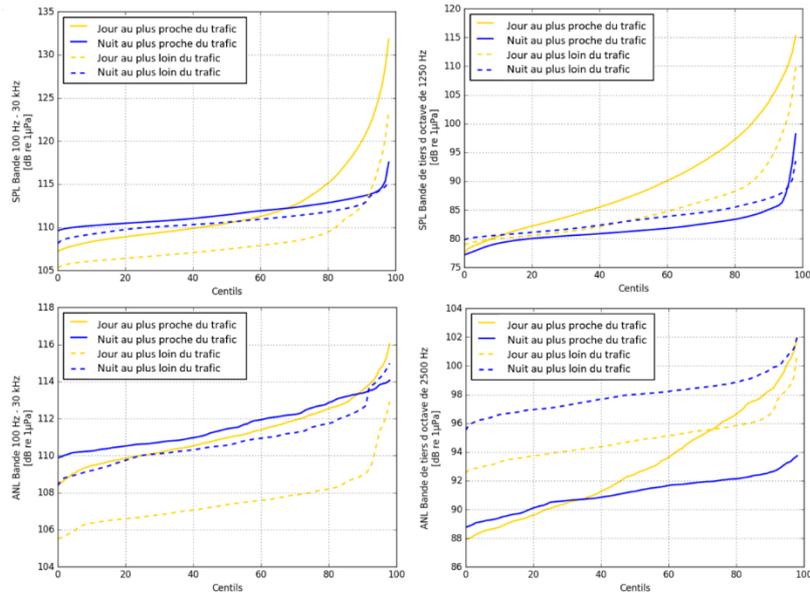


Figure 57 : Fonctions de répartition durant le jour (jaune) et durant la nuit (bleu) en fonction des variations spatiales : au plus proche du trafic (trait plein) et au plus loin du trafic (trait en pointillés)

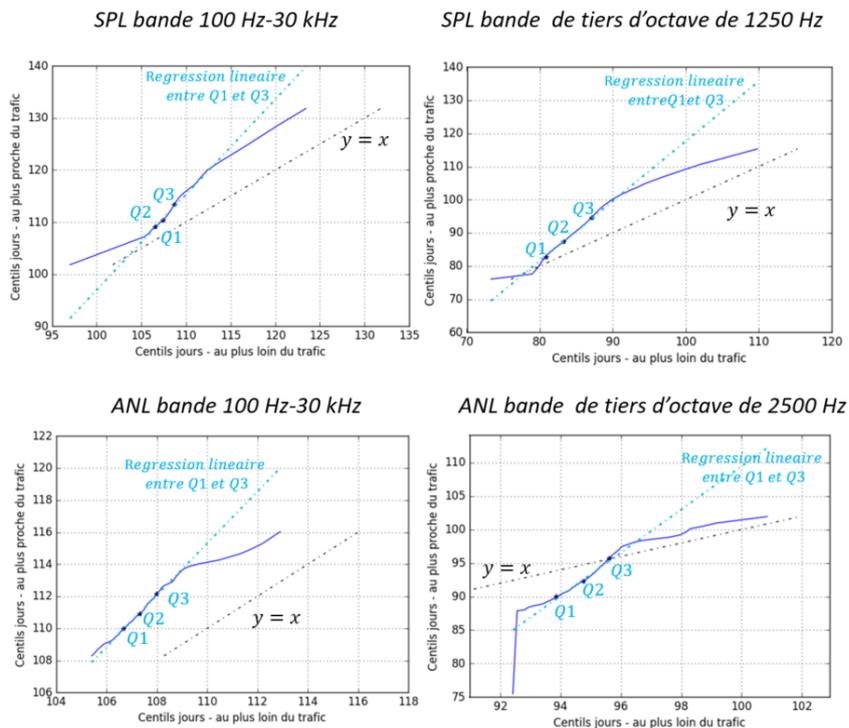


Figure 58 : Diagramme quantile-quantile entre les données de jour au plus proche du trafic et au plus loin du trafic maritime

5.4.4 La variabilité journalière durant la saison estivale

En raison des variabilités saisonnières et spatiales de l'activité biologique, des divergences de résultats sont observées pour les descripteurs estimés dans les bandes de tiers. Les niveaux dans les bandes 100 Hz-30 kHz sont retenus pour cette section. En raison de la forte activité biologique observée durant l'ensemble de la nuit, les niveaux de référence ne peuvent être choisis durant les périodes les plus calmes de la nuit. Ce choix s'est donc porté sur le niveau diurne plus probable.

Au plus proche du trafic maritime, l'évolution du pourcentage de dépassement par session de 10 minutes permet alors de retrouver le rythme biologique et le rythme des plaisanciers. L'augmentation du pourcentage de dépassement au lever et au coucher du soleil correspond à la production sonore benthique et ichtyologique. Cette forte activité biologique nocturne provoque un pourcentage de session de 10 minutes ayant un dépassement conséquent du seuil de référence plus important durant la nuit que durant le jour (Table 24). Cette contribution devient moins importante pour un dépassement de 3 dB et négligeable pour un dépassement de 5 dB par rapport au niveau de référence. Durant la journée, l'étude des niveaux ANL des deux bandes de fréquence fait ressortir le dépassement du seuil de référence avec l'apparition du trafic maritime. La journée est divisée en deux parties distinctes séparées par la pause déjeunée (Figure 59). L'étude des niveaux SPL permet de détecter cinq pics d'activité à proximité de la pointe de la Revellata liés aux horaires de location de bateaux ou de circuits touristiques : 9h30, 11h30, 14h30, 15h30 et 17 h. Cette brusque activité provoque des dépassements de plus 10 dB par rapport au niveau référence pendant un temps cumulé inférieur à 2 minutes sur 10 minutes dans la bande 100 Hz-30 kHz. **Le trafic maritime devient le principal contributeur pour les dépassements supérieurs à 5 dB pour la bande 100 Hz- 30 kHz.** Un tel dépassement est remarqué durant **2,3 % du jour pour l'ANL 100 Hz-30 kHz et 21,5 % du jour pour les niveaux SPL dans la bande 100 Hz-30 kHz** (Table 26).

	SPL au plus proche du trafic		ANL au plus proche du trafic	
	Jour	Nuit	Jour	Nuit
Pourcentage de sessions ayant un dépassement > 80 % (SPL) ou 90% (ANL)	0 %	44 %	2,3%	51,7%

Table 24 : Pourcentage de sessions de 10 minutes dont le descripteur acoustique observe un dépassement du niveau de référence supérieur à 6 à 9 minutes durant le jour et durant la nuit, au plus proche du trafic maritime

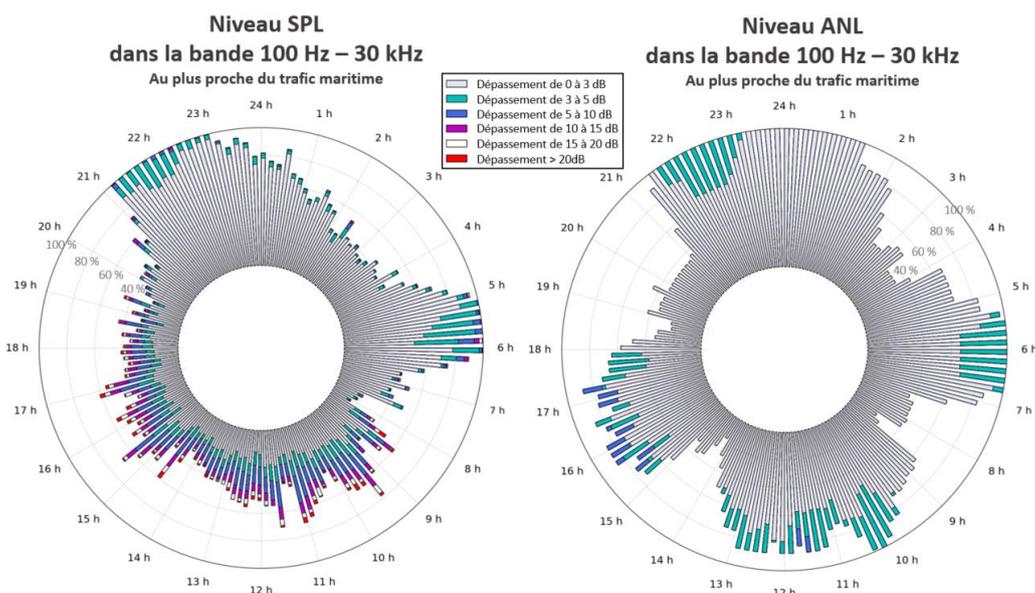


Figure 59 : Evolution journalière du niveau SPL (à gauche) et de l'ANL (à droite) dans la bande 100 Hz-30 kHz au plus proche du trafic maritime : Estimation du pourcentage de dépassement du seuil par session de 10 minutes.

Lorsque l'on s'éloigne du trafic, **une forte atténuation de l'influence du rythme des plaisanciers** est observée alors que les nuits sont toujours marquées par le rythme biologique. Ainsi, suite à la forte diminution du nombre de sessions diurnes dépassant le niveau de référence, la pause repas et les heures de location sont perceptibles, mais moins marquée (Table 25).

	Au plus proche du trafic		Au plus loin du trafic	
	SPL	ANL	SPL	ANL
Pourcentage de session diurne ayant un dépassement > 30% (SPL) ou > 0% (ANL)	96.4 %	97.5 %	72.5 %	60 %

Table 25 : Comparaison du pourcentage de session diurne dépassement le niveau de référence entre une position proche et éloigné du trafic maritime

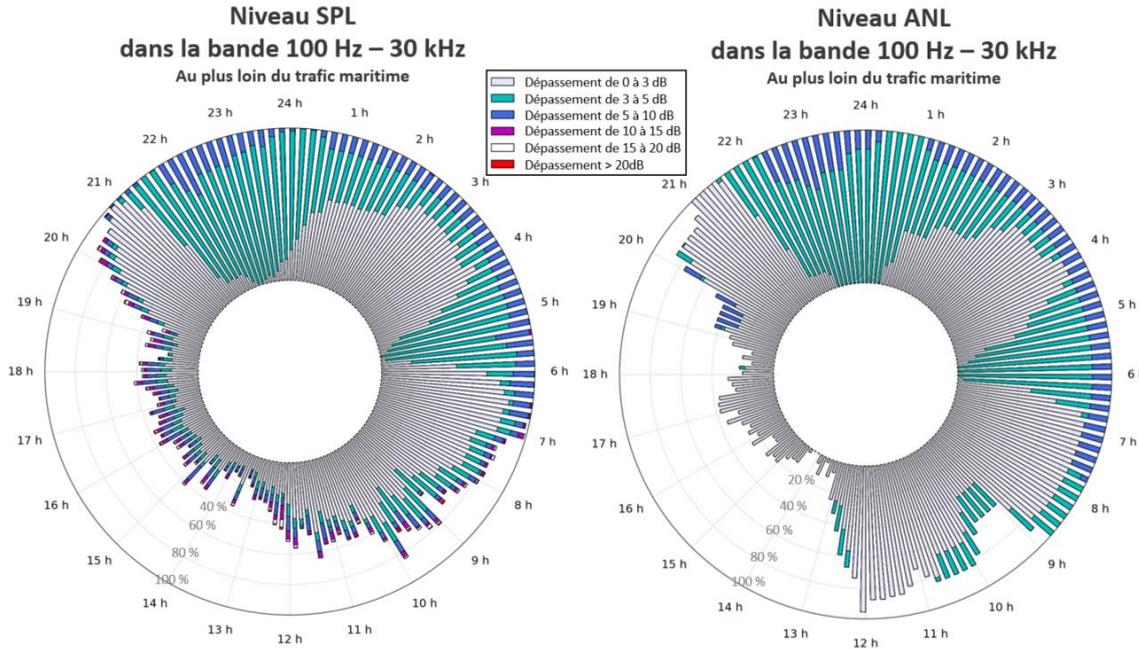


Figure 60 : Evolution journalière du niveau SPL (à gauche) et de l'ANL (à droite) dans la bande 100 Hz-30 kHz au plus loin du trafic maritime : Estimation du pourcentage de dépassement du seuil par session de 10 minutes.

Descripteurs		Au plus proche du trafic			Au plus loin du trafic		
		Total	Jour	Nuit	Total	Jour	Nuit
SPL 100 Hz – 30 kHz	De 0 dB	81.42 %	69.95 %	99.57 %	82.68 %	71.87 %	99.7 %
	De 3 dB	29.69 %	30.47 %	28.46 %	30.58 %	30.57 %	30.6 %
	De 5 dB	14.66 %	21.54 %	3.78 %	14.75 %	21.46 %	4.19 %
	De 10 dB	6.35 %	9.97 %	0.62 %	6.32 %	9.93 %	0.65 %
	De 15 dB	2.77 %	4.42 %	0.15 %	2.73 %	4.37 %	0.15 %
	De 20 dB	1.06 %	1.71 %	0.03 %	1.06 %	1.71 %	0.03 %
ANL 100 Hz – 30 kHz	De 0 dB	80.75 %	71.32 %	95.77 %	80.32 %	70.29 %	95.72 %
	De 3 dB	13.67 %	12.12 %	16.14 %	13.5 %	11.65 %	16.33 %
	De 5 dB	1.43 %	2.33 %	0.0 %	1.48 %	2.44 %	0.0 %

Table 26 : Pourcentage de dépassement du niveau de référence durant la saison estivale pour la bande 100 Hz – 30 kHz

5.5 Discussion

5.5.1 La variabilité liée à la production sonore biologique

La présence d'un rythme diurne / nocturne lié à la présence de l'activité d'un chœur de poissons au lever et au coucher du soleil observée est confirmée par [Erbe_2015, Guan_2015, Buscaino_2016]. Une variabilité de l'activité biologique entre les sessions est observée. Des variabilités saisonnières et lunaires ont été mises en évidence pour la population benthique [Cato_2002, Lobel_2010] et ichtyologique [Di Iorio_2018]. Les enregistrements ayant été réalisés à des phases lunaires différentes, il est difficile d'affirmer avec certitude qu'il s'agit d'une variabilité saisonnière ou lunaire. Les résultats de l'étude ont montré des incohérences lors de l'analyse des deux bandes de tiers d'octave par rapport au niveau large bande et à l'observation du trafic maritime, induites par les variations de l'activité biologique.

La divergence de résultats est particulièrement marquée pour le niveau SPL dans la bande de tiers d'octave de 1250 Hz. Cette bande de fréquence est affectée par une forte production sonore des poissons durant la journée même en l'absence de trafic maritime (octobre au plus loin du trafic). Par ailleurs, la visualisation de distribution montre une meilleure correspondance avec le trafic maritime pour la position la plus proche du trafic maritime. Ce résultat **interpelle alors sur l'effet du trafic maritime sur la production sonore ichtyologique et la variabilité spatiale des poissons**. Il est ainsi possible de se demander si la présence massive du trafic maritime provoque soit un masquage quasi permanent des émissions de poissons, soit une diminution des émissions des poissons traduisant un stress provoqué par le trafic maritime, soit une différence de population de poissons en fonction de la fréquentation de la baie par les bateaux. Une étude complémentaire serait alors à réaliser pour comprendre l'origine de ces variabilités.

Parallèlement, l'augmentation des niveaux ANL dans la bande de tiers d'octave de 2500 Hz observée lors du changement de position dans la baie est liée à une variabilité de l'activité benthique. Ces enregistrements ayant été effectués dans la même phase lunaire et tous deux en Juillet, la variabilité lunaire et saisonnière ne justifie pas cette observation. La visualisation des spectrogrammes permet d'observer l'origine de cette variabilité : l'activité liée au benthos est caractérisée par la présence de clics benthiques à partir de 3.5 kHz pour la position à la pointe de la Revellata et à partir de 2 kHz pour les positions à proximité de Stareso. Entre ces deux positions, la distance à la côte diffère : 120 m en Juillet 2015 et 230 m en Juillet 2016, créant une atténuation des sons émis par la côte de 4.4 dB. Les impulsions benthiques proviennent de différentes populations benthiques présentes sur la côte rocheuse [Lossent_2017]. La position au plus loin du trafic maritime est située à l'intérieur de la baie et permet d'entendre l'activité benthique émise par l'ensemble de la côte. A l'inverse, pour la position la plus éloignée du trafic maritime, seule l'activité benthique associée à la pointe de la Revellata semble être entendue. Cette observation **interroge alors sur l'origine et la localisation des clics benthiques entendus**.

5.5.2 Le choix des indicateurs acoustiques pour le suivi d'une zone côtière

Les travaux présentés dans ce chapitre illustrent **la nécessité d'effectuer un suivi spatio-temporel lors du choix d'un indicateur acoustique** et montre à travers les descripteurs estimés dans les deux bandes de tiers d'octave les **incohérences observées lorsqu'un indicateur est choisi en considérant seulement son adéquation avec la source anthropique à quantifier**.

La variabilité spatio-temporelle de l'**activité biologique devient une autre limite à la définition de ces descripteurs acoustiques** pour le suivi de l'activité anthropique en zone côtière. Des variations des niveaux acoustiques diurnes sont produites par les variations de la production sonore benthique (supérieure à 2,5 kHz) et ichtyologique (200 Hz et 1250 Hz). Ces variations altèrent alors l'information

portée par les descripteurs acoustiques sur le trafic maritime, particulièrement pour les deux descripteurs acoustiques estimés dans les bandes de tiers d'octaves présentant pourtant le maximum de corrélation avec le trafic maritime. Ces descripteurs ne peuvent convenir pour le suivi anthropique globale de la baie. De plus, en fonction des sites étudiés, à cette variabilité biologique (benthique et ichtyologique) s'ajoutent les variations de niveaux induits par les vocalises de mammifère marins entre 1 et 20 kHz pour les dauphins (Globicéphales, Delphinidés, etc.) [LeBot_a_2015]. Le *Tursiops truncatus* (vocalises entre 3 et 23 kHz [Buckstaff_2004]) est couramment présent dans les environnements côtiers du sanctuaire Pelagos [Arcangeli_2014] et occasionnellement observé dans la baie de Calvi. En l'absence de dauphin lors des enregistrements acoustiques, cette variabilité n'a pu être testée dans cette thèse.

Différentes bandes de tiers d'octaves dédiées à l'étude du trafic maritime pour un site donné sont présents dans la littérature : 63, 125 Hz [EuropeanCommission_2010], 250 Hz, 500 Hz [Merchant_2014] et 10 kHz [Hermannsen_2014]. Ces études sont basées sur les caractéristiques acoustiques du trafic maritime seul, sans étude acoustique de la biologie présente dans le site. Parmi ces différentes bandes de fréquences, seules les bandes de 63, 125 Hz ne seraient pas sujettes à la variabilité spatio-temporelle de l'activité biologique observée dans cette thèse. Toutefois, l'étude d'un environnement côtier à travers ces deux bandes est difficilement envisageable due à la fréquence de coupure induit par les environnements petits fonds [Hughes_1990, Forrest_1993, D'Spain_1999].

De plus, les résultats de cette thèse interpellent sur **la validité d'un choix d'un unique indicateur acoustique d'étude de l'ensemble des sites côtiers**. En effet, les bandes de fréquences proposées par [Merchant_2014] et [Hermannsen_2014] sont parfaitement adaptées à leurs sites d'études. De plus, le bruit ambiant évolue en fonction de l'environnement considéré : il est donc difficile de définir un niveau absolu de référence unique pour l'ensemble de sites. L'analyse conjointe des chapitres 4 et 5 de cette thèse permet alors de définir **un protocole pour la sélection des descripteurs acoustiques pour le suivi côtiers du trafic maritime**. Ce protocole est composé d'une étude de corrélation trafic maritime / acoustique / données météorologiques (chapitre 4) suivie d'une étude spatio-temporelle d'une sélection de descripteurs acoustiques (chapitre 5). Dans le cadre de la baie de Calvi, deux types d'indicateurs acoustiques sont envisagés :

- Le choix d'un niveau large bande (100 Hz – 30 kHz dans notre cas) qui permettent d'identifier l'information sur le trafic maritime tout en étant moins sensible aux phénomènes environnementaux. L'utilisation de niveaux large bande semble d'avantage adaptée pour le suivi des environnements côtiers.
- Le choix d'un niveau dans la bande de tiers d'octave de 1.6.

Outre l'aspect visant à définir la bande optimale de fréquence pour effectuer un suivi environnemental, les résultats observés nous interrogent sur la validité d'un indicateur basé sur un niveau acoustique absolu. Ainsi, il est possible de se demander si des descripteurs de formes du signal permettent un suivi environnemental moins contraint par les variabilités des productions sonores biologiques.

5.5.3 La limite de l'étude liée au choix des descripteurs acoustiques

Les descripteurs acoustiques étudiés dans cette thèse permettent de constater la variabilité spatio-temporelle du paysage acoustique, mais sans apporter de réponse précise sur la quantification des différents acteurs du site.

En effet, même si l'objectif des deux descripteurs estimés dans les bandes de tiers d'octave n'était pas dédié à l'étude de la biologie, ces deux descripteurs traduisent les variabilités spatio-temporelles de

cette dernière. Par la largeur de bande considérée, le descripteur large bande entre 100 Hz et 30 kHz est moins sensible à la variabilité spatio-temporelle de l'activité biologique que les deux autres descripteurs. A noter que les bruits rayonnés par les bateaux étant large bande et variant avec la fréquence, l'étude d'un niveau large bande permet de quantifier l'énergie apportée par l'ensemble du spectre. Cependant, cette bande de fréquence intègre l'ensemble de l'activité biologique. Il est donc difficile d'attribuer un dépassement des niveaux de référence uniquement dû au trafic maritime. Le dépassement de 5 dB du seuil de référence, dans le cas de l'étude au plus proche du trafic maritime, permet d'exclure les dépassements liés à la biologie : au plus proche du trafic maritime, peu de dépassement de plus de 5 dB sont observés durant la nuit. En revanche, ce choix de seuil ne permet de quantifier l'ensemble des dépassements liés au trafic maritime.

Ce choix n'est donc pas idéal pour la quantification précisément de l'apport des différentes sources sonores dans le paysage acoustique. Au regard des résultats observés, l'étude de la contribution des différents acteurs du site semble s'orienter vers trois bandes de fréquences « optimales » :

- Les niveaux dans la bande de tiers d'octave de 800 Hz permettant l'étude de l'activité ichtyologique et du trafic maritime,
- Les niveaux dans la bande de tiers d'octave de 1600 Hz permettant l'étude du trafic maritime seul,
- Les niveaux dans la bande 3 kHz- 30 kHz, permettant l'étude de l'activité benthique et du trafic maritime.

Des limites à la quantification précise de l'apport de chaque source persistent dans le choix de ces trois bandes de fréquences « optimales ». En effet, le spectre de bruit rayonné par un bateau dépend de la fréquence (voir chapitre 1 - 1.5.3 – p 24). L'apport du trafic maritime dans la bande de 1.6 kHz ne peut être soustrait aux observations dans les deux autres bandes de fréquences afin d'estimer la contribution des sources benthiques et ichtyologiques.

Pour pallier ce phénomène et quantifier plus précisément l'apport du trafic maritime en conservant les indicateurs étudiés dans ce chapitre, il est recommandé d'estimer les niveaux dans la bande de tiers d'octave de 1,6 kHz (moins affectée par la biologie). Une étude croisée est alors à effectuer avec le niveau large bande. Le niveau dans la bande de tiers d'octave de 1,6 kHz permet alors d'identifier les instants où le dépassement est dû au trafic maritime : quantifier le pourcentage de temps où un dépassement est observé. Pour ces instants de dépassement, l'estimation du niveau large bande permet de quantifier en termes de niveau l'apport du trafic maritime.

5.6 Conclusion

Ce chapitre développe un suivi spatio-temporel des descripteurs acoustiques SPL et ANL. Cette caractérisation est faite par l'analyse des variations diurne / nocturne, journalières, saisonnières et spatiales observées dans la baie. Pour atteindre ces objectifs, chaque période de 24 h est divisée en deux périodes : le jour et la nuit. Ce chapitre permet alors de conclure sur :

- La variabilité du paysage acoustique d'un environnement côtier,
- La contribution du bruit du trafic maritime dans le paysage acoustique d'un environnement côtier,
- Un protocole de sélection d'indicateurs acoustiques de suivi environnemental des pressions anthropiques.

Le paysage acoustique d'un environnement côtier est soumis à une variabilité naturelle. L'alternance diurne / nocturne est principalement marquée par l'augmentation au lever et au coucher du soleil de l'activité sonore benthique et ichtyologique et le trafic la journée. L'activité nocturne des poissons est

un élément important qui modèle le paysage acoustique : les niveaux moyens et médians sont plus importants durant la nuit (pour une position éloignée du trafic). La contribution de l'activité nocturne des poissons devient moins importante pour un dépassement de 3 dB et négligeable pour un dépassement de 5 dB par rapport au niveau de référence. Parallèlement à la variabilité saisonnière du trafic maritime, le paysage acoustique est soumis à la variabilité saisonnière et lunaire de l'activité sonore benthique et ichtyologique. Cette variabilité se caractérise par une diminution des niveaux pour chaque centile lorsque l'on s'écarte de la saison estivale. Le changement de position dans la baie montre une variabilité de l'activité biologique, en termes de fréquence pour l'activité benthique et semble avoir une influence sur les émissions de poissons.

La contribution du trafic maritime est particulièrement remarquable pour les variations diurne/ nocturne (réduction des différences diurne / nocturne, voire une inversion) et spatiale (très forte variabilité en fonction de la position par rapport au trafic) et se traduit principalement en termes de valeurs extrêmes. La contrainte spatiale étant plus importante que la contrainte saisonnière, les résultats de l'évolution saisonnière montre une influence modérée de la présence du trafic maritime. Au plus proche du trafic maritime durant la saison estivale, le paysage acoustique est marqué par le rythme biologique (l'augmentation au lever et au coucher du soleil) et le rythme des plaisanciers (pause déjeuner, horaires de location et de circuits touristiques). Lors de l'éloignement physique par rapport au trafic maritime durant la saison estivale ou temporel par rapport à la saison estivale, le rythme des plaisanciers s'efface. La forte variabilité spatiale observée durant la saison estivale en fonction de la proximité du trafic maritime, montre que le suivi acoustique des bruits liés au trafic de plaisance dans une baie côtière, ne peut être réalisé en un seul point de mesure. L'influence du trafic maritime dans le paysage côtier est toutefois à relativiser : les dépassements des niveaux moyens et médians diurnes par rapport au niveau nocturne restent faibles et un dépassement de 5 dB (non induit par la biologie) n'est observé que 2.3 % du jour pour l'ANL et 21.5% du jour pour le SPL dans la bande 100 Hz- 30 kHz.

Les travaux réalisés dans ce chapitre montrent la nécessité d'effectuer un suivi spatio-temporel préliminaire avant de définir un indicateur acoustique dans le cadre du suivi du trafic maritime dans une zone côtière. Chaque site côtier est soumis à des variabilités saisonnières dues à l'activité biologique (benthique, ichtyologique et mammifère marin). Cette activité diffère en fonction du site d'étude et au sein d'un même site d'étude. Les résultats observés de cette thèse interpellent alors sur la validité d'un choix d'un unique indicateur acoustiques d'étude de l'ensemble des sites côtiers. L'analyse conjointe des chapitres 4 et 5 de cette thèse permet alors de définir un protocole pour la sélection des descripteurs acoustiques pour le suivie côtiers du trafic maritime. Ce protocole est composé d'une étude de corrélation trafic maritime / acoustique / données météorologiques (chapitre 4) suivie d'une étude spatio-temporelle de sélection de descripteurs acoustiques (chapitre 5). Dans le cadre de la baie de Calvi, les descripteurs estimés dans les bandes de tiers d'octave de 1250 Hz et 2500 Hz, traduisent au mieux l'information sur le trafic maritime par rapport aux autres bandes de tiers d'octave, mais sont fortement sujets aux variabilités spatiales temporelles des productions benthiques et ichtyologiques (Figure 61). Ces deux descripteurs acoustiques ne peuvent être retenus pour effectuer un suivi environnemental de la pression anthropique. Deux types d'indicateurs liés au niveau acoustiques sont envisagés : le choix d'un niveau large bande qui permet d'identifier l'information sur le trafic maritime tout en étant moins sensible à ces phénomènes biologiques ou le choix d'un niveau dans les bandes de tiers d'octaves de 1.6 kHz.

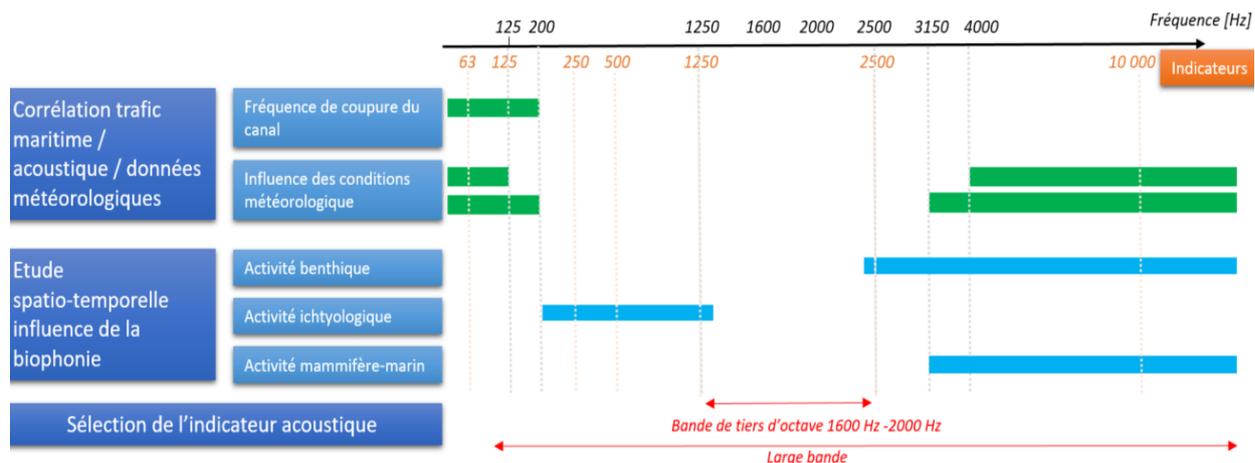


Figure 61 : Synthèse sur la sélection d'indicateurs acoustiques de suivi environnemental des pressions anthropiques

Les résultats montrés dans ce chapitre soulèvent alors des questions sur l'intérêt d'effectuer un suivi acoustique de l'activité anthropophonique par l'étude de niveau acoustiques et nous interrogent sur l'utilisation de descripteurs de formes du signal. Des premiers éléments de réponse sont apportés dans le chapitre 7.

Parti 3 : Reconnaissance acoustique des embarcations d'une flottille côtière par apprentissage supervisé

La détection et la classification de navires deviennent d'un intérêt majeur lors de la seconde guerre mondiale et de la guerre froide et engendrent les premières études sur le bruit rayonné des bateaux [Ross_1976, Urick_1983, Wright_1983]. Cette thématique reste l'un des éléments clés de nos forces sous-marines. Dans un premier temps, ces questions sur la classification acoustique des bateaux se transposent dans le domaine civil hauturier en forte croissance depuis les années 1990 [Tournadre_2014]. Les premiers travaux ont été effectués sur la classification acoustique de grandes embarcations de commerce [Lourens_1987, Das_2011, Arveson_2000]. L'essor de l'activité maritime côtière et des activités littorales appellent à de nouvelles demandes de détection et classification. Tout comme dans le domaine militaire, certaines applications visent à la surveillance discrète de zones telles que la protection de port contre le terrorisme, la protection de culture aquacole contre les braconniers, la surveillance de zones protégées à trafic maritime limité [Sutin_2013a, Fillinger_2011, Chung_2011]. D'autres applications sont plus spécialisées comme par exemple dans la détection de bateaux transportant des drogues (*GoFast*) [Pollara_2016].

La classification des petites embarcations, pratiquement inexistante dans la littérature, représente un enjeu important. Lorsque nous sommes à la plage et que nous écoutons ce qui se passe sous l'eau, nous arrivons à faire la distinction entre les sons émis par différentes embarcations. Les petites embarcations produisent des sons plus « stridents » alors que les grandes embarcations produisent des sons plus « sourds ». Cette capacité de notre système auditif à aisément faire la distinction entre différents types de bruits rayonnés nous interpelle sur les critères utilisés. La diversité des embarcations présentes dans la baie de Calvi, amène à se poser des questions sur leur bruit rayonné :

- *Existe-t-il des différences acoustiques entre les petites embarcations et comment peut-on classer acoustiquement cette flottille ?*
- *Ces différences peuvent-elle être caractérisées par des descripteurs acoustiques et exploitées dans un objectif de détection et de classification automatisée ?*

Cette partie se décompose en un recueil de trois chapitres. Ces chapitres partagent une base de données acoustiques commune et un état de l'art commun sur les méthodes et les paramètres de classification de diverses sources sonores. Ces deux éléments sont présentés dans le chapitre 6. Dans **le chapitre 6**, les bruits rayonnés par les petites embarcations seront visualisés à travers quatre espaces de représentation. Ces visualisations permettent d'identifier des éléments singuliers et discriminants en fonction des caractéristiques physiques et contextuelles du bateau (taille, catégorie, vitesse, etc.). Un ensemble de descripteurs acoustiques permettra de caractériser ces singularités dans le **chapitre 7**. L'analyse conjointe des descripteurs acoustiques et des paramètres décrivant les bateaux permet de définir une arborescence de classification des petites embarcations. L'arborescence et les paramètres acoustiques seront utilisés avec des méthodes de classification supervisées afin de tester la capacité des descripteurs à détecter et identifier les petites embarcations dans le **chapitre 8**.

6 Chapitre 6 : Caractérisation du bruit rayonné par les bateaux d'une flottille côtière

Sommaire

6.1	Introduction.....	124
6.2	Descripteur pour la détection et la classification de sources continues avec présence de tonale : état de l'art.....	125
6.2.1	Dans la communauté d'acoustique sous-marine (bateau)	125
6.2.2	Dans la communauté d'acoustique aérienne (véhicules motorisés)	128
6.2.3	Dans la communauté de traitement audio (parole et musical)	129
6.3	Présentation de la base de données et des espaces de représentation.....	130
6.3.1	Présentation des bases de données acoustiques.....	130
6.3.2	Durée d'analyse pour l'ensemble des domaines	131
6.3.3	Présentation des espaces de représentation	132
6.3.4	Méthode d'analyse.....	133
6.4	Visualisation des bruits rayonnés à travers différents espaces de représentation	133
6.4.1	Représentation dans le domaine spectrale.....	133
6.4.2	Analyse DEMON	136
6.4.3	Analyse du cepstre	139
6.4.4	Analyse des coefficients MFCC.....	141
6.5	Discussion	143
6.5.1	Premiers éléments pour la création de l'arborescence de classification.....	143
6.5.2	Apport des différents espaces de représentation.....	143
6.5.3	Limitation de la méthode DEMON	144
6.6	Conclusion	145

6.1 Introduction

Les bruits rayonnés par les bateaux sont composés d'un bruit large bande principalement lié au phénomène de cavitation et d'un bruit bande étroite généré par les systèmes en rotation (propulsion, motorisation et auxiliaire). De ce fait, la visualisation dans le domaine fréquentiel est la méthode la plus couramment utilisée pour l'étude de cette source sonore et concerne une très grande majorité des études. Différents domaines d'analyses sont délaissés par la communauté de l'acoustique sous-marine et pourtant bien présentes d'autres communautés (traitement de la parole, classification musicale), tel que le domaine perceptuel.

L'objectif de ce chapitre est d'aborder l'étude des bruits rayonnés par les bateaux en analysant dans différents espaces de représentation, incontournables à l'étude de ce type de source sonore et moins familiers à cette thématique. Afin d'apporter de premiers éléments de réponses concernant la possibilité de différencier des embarcations d'une flottille côtière, une attention particulière sera portée sur la recherche d'éléments acoustiques discriminants en fonction d'une caractéristique physique ou contextuelle des bateaux.

Ce chapitre est divisé en quatre sections. La première section permet de dresser l'état de l'art sur la détection et la classification de sources sonores dans différentes communautés, et plus particulièrement sur les espaces de représentation et les types de paramètres acoustiques utilisés pour différencier des sons. La première attention est portée sur l'étude en acoustique sous-marine des bruits rayonnés par les bateaux. En raison de la nature de la source de bruit étudiée, une synthèse est faite sur la détection et la classification de bruit de véhicules motorisés terrestres (voiture et deux roues motorisées) et aériens. Cette section se termine par une présentation des paramètres utilisés en classification de genre musical. Pour ce chapitre, seul l'aspect identification des potentiels espaces de représentation d'intérêt sera retenu.

La deuxième section développe la base de données spécifiquement développée pour cette section ainsi que les quatre espaces de représentation, issus de la revue bibliographique, choisis pour étudier les différences de bruits rayonnés entre les petites embarcations : l'analyse spectrale, l'analyse DEMON, l'analyse cepstrale et l'analyse des coefficients de Mel. L'intérêt de chaque méthode pour ce type de source sonore sera justifié.

Les résultats seront commentés dans la troisième section. Pour chaque espace de représentation, ils sont comparés en fonction des caractéristiques physiques et contextuelles des passages associés, afin d'identifier les éléments discriminants des catégories de bateaux. La quatrième section explique la pertinence et l'apport de différentes méthodes d'analyse. Les premiers éléments de l'arborescence de classification sont exposés.

6.2 Descripteur pour la détection et la classification de sources continues avec présence de tonale : état de l'art

Cette revue bibliographique a pour objectif de présenter les différents espaces de représentation permettant d'extraire les paramètres de détection et de classification des sources sonores. Une étude détaillée sera consacrée aux bruits rayonnés par les bateaux, sujet principal de ces travaux. Ce type de source sonore partage des caractéristiques communes avec les véhicules motorisés terrestres et aériens, en particulier en ce qui concerne la présence de raies spectrales. Après une synthèse faite sur les différents travaux réalisés en acoustique aérienne, un parallèle a pu être réalisé entre le bruit des bateaux et l'analyse instrumentale et de genre musical. L'aspect multifréquences fondamentales est présent dans le signal en raison de la superposition des sources au sein d'un bateau (harmoniques dues au moteur et harmoniques dues à l'hélice) et du mélange des signatures acoustiques de plusieurs bateaux. La notion d'harmonique et de mélodie, employée dans le domaine de la recherche d'information musicale, fait écho à la notion d'énergie large bande et d'énergie bande étroite des bruits rayonnés par les bateaux. Une synthèse des travaux de classification de genre musicaux est présentée.

6.2.1 Dans la communauté d'acoustique sous-marine (bateau)

Que ce soit pour la surveillance et la protection de zones spécifiques [Sutin_2013a] ou la détection de bateaux transportant des drogues [Pollara_2016], la détection et classification de bateaux par acoustique passive est un sujet majeur qui, depuis ces dernières années, suscite l'intérêt des organisations de défense. Cette détection peut être réalisée sur la détection de bruits stationnaires ou de bruits transitoires : [Zaugg_2010] réalise une classification de bruits impulsifs de clics de baleine et de bruits transitoires provoqués par les bateaux en utilisant un réseau de neurone basé sur 9 paramètres. Les travaux présentés dans ce manuscrit s'intéressent à la détection et la classification du bruit global reçu, sans détection de transitoire. Outre les détecteurs automatiques caractérisant un passage de bateau par une augmentation des niveaux acoustiques, des algorithmes plus élaborés de détection de bateaux sont présents dans la littérature. Ces algorithmes caractérisent les bruits induits par les passages de bateaux avec un ensemble de paramètres. Ces paramètres sont estimés sur différentes caractéristiques détaillées Figure 62 ci-dessous. Même si une variété de méthodes concernant la détection et la classification des bateaux est présentée, la grande majorité des études sont réalisées par analyse spectrale et DEMON. Les autres méthodes d'analyse de la revue bibliographique représentent une faible proportion des travaux réalisés sur ce sujet.

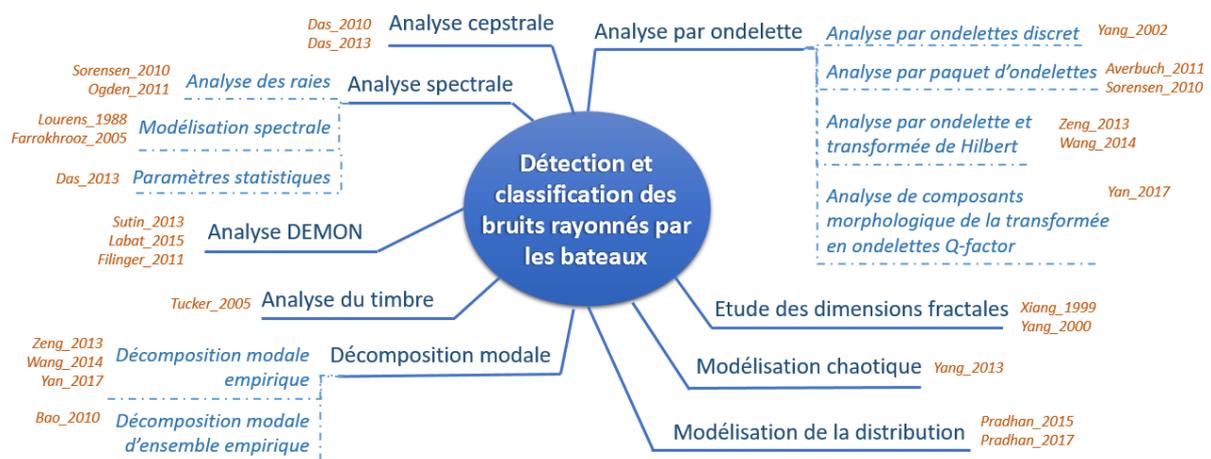


Figure 62 : Méthode de détection et classification des bruits rayonnés de bateaux présent dans la communauté d'acoustique sous-marine

Le chapitre 1 a mis en évidence que les éléments mécaniques en rotation, tels que les pales d'hélices, l'arbre du moteur et les auxiliaires, provoquent l'apparition de raies spectrales et de leurs harmoniques [chapitre 1]. La méthode de détection et de classification la plus couramment utilisée consiste en l'analyse de ces raies. Cette analyse peut être réalisée directement sur la visualisation spectrale du signal [Arveson_2000]. [Sorensen_2010] et [Ogden_2011] appliquent un filtre de Kalman pour effectuer le suivi temporel de cette fréquence fondamentale et identifient les bateaux en se basant sur une caractérisation de la structure d'harmoniques correspondant à l'affichage du niveau enregistré pour chaque fréquence associée à l'indice de l'harmonique. Une analyse plus fine des caractéristiques des raies est réalisée par analyse DEMON (*Detection of Enveloppe Modulation On Noise*) [Lourens_1988, Sutin_2013a, Labat_2015]. Cette méthode est fondée sur l'analyse des modulations de l'enveloppe du signal. L'estimation de la transformée de Fourier ou du spectrogramme à l'issue de l'analyse DEMON permet d'identifier les caractéristiques propres du bateau : la fréquence de rotation d'une pale d'hélice, la fréquence de rotation de l'arbre d'hélice et par conséquent du nombre de pales. [Kummert_1993] identifie ces paramètres sur l'analyse DEMON en suivant une logique « fuzzy » où un indice de confiance est attribué aux 20 fréquences fondamentales testées. L'analyse DEMON est particulièrement sensible au mélange de signatures acoustiques. Ainsi [Fillinger_2011, Chung_2011] réalisent une séparation de sources par corrélation entre deux hydrophones avant d'effectuer une analyse DEMON sur la fonction d'autocorrélation.

[Tucker_2005] définit une liste de descripteurs acoustiques estimés sur la représentation temps-fréquence du signal. Ces descripteurs acoustiques permettent la classification des bruits rayonnés par les navires de types bruit de propulsion et bruit de machinerie (moteur).

L'analyse spectrale du signal permet aussi d'identifier le type de propulsion. Ainsi [Lourens_1987] crée trois catégories de bateaux basées sur l'analyse du spectre : les diesels lents (spectre large bande correspondant au son de broyage et de grattage créé par des anneaux de compression gigantesques), les diesels rapides (spectre composé de raies liées au claquement des pistons des moteurs diesels et de décroissance exponentiellement) et les turbines (spectre composé de quelques lignes spectrales). L'analyse des pôles obtenus après modélisation autorégressive (AR) d'ordre 2 de la transformée de Fourier permet ce classement. Ces travaux sont repris par [Farrokhrooz_2005_a] qui, en estimant le modèle AR d'ordre 13 à 15 de la PSD, réalise une classification en trois catégories basées sur la taille du navire : lourd, médian et léger. [Wales_2002] utilise la modélisation AR pour décrire le spectre des bateaux.

Il existe deux types de traitement multi-échelle des données : l'analyse par ondelette et la décomposition modale [Meignen_2007]. Ces méthodes sont exploitées dans la littérature de détection et classification de bruits rayonnés par les bateaux. L'analyse par ondelettes est aussi utilisée pour la détection et la classification de bateaux. Ainsi, [Averbuch_2011] propose un algorithme permettant de détecter les bateaux et d'identifier un type de bateau particulier. Cette méthode se base sur l'estimation de la transformée en paquet d'ondelettes et la création d'une carte d'énergie représentant l'énergie dans le bloc d'ondelettes pour les six premiers niveaux de décomposition. Huit blocs présentant des différences majeures sont sélectionnés et utilisés pour la classification. [Sorensen_2010] réalise une décomposition discrète par paquet d'ondelettes en considérant des ondelettes de type Daubechies. Un test d'hypothèse basé sur le seuillage de l'énergie des différentes transformées en ondelettes permet de détecter la présence de bateau. Le même type d'ondelette est utilisé par [Yang_2002] qui propose de classer les bateaux en utilisant le maximum de vraisemblance entre l'analyse par ondelettes du signal et un modèle établi pour chaque classe de bateau. D'autres études combinent l'analyse par ondelettes à d'autres méthodes d'analyse pour réaliser la détection de bateaux par acoustique passive. Ainsi, [Zeng_2013, Wang_2014] allie une décomposition en

ondelettes de type Bark à une transformation de Hilbert-Huang. [Yan_2017] crée une décomposition du signal en niveaux de résonance par une analyse de composantes morphologiques de la transformée en ondelettes Q-factor. Une analyse spectrale marginale de Hilbert (*Hilbert marginal spectrum analysis*) est effectuée sur la composante de forte résonance.

L'analyse spectrale de Hilbert permet à [Zeng_2013, Wang_2014, Yan_2017] d'effectuer une analyse par décomposition modale empirique (*Empirical Mode Decomposition*): le signal est décomposé en un ensemble de fonctions modales intrinsèques (*Intrinsic Mode Functions*). Cette méthode vise à exploiter les non-linéarités et non stationnarités présentes dans un signal de bruit rayonné par un bateau. Ces fonctions intrinsèques modales sont estimées par [Bao_2010] en réalisant une décomposition modale d'ensemble empirique (*Ensemble Empirical Mode Decomposition*), dans l'objectif de définir des paramètres reflétant la dynamique non-linéaire sous-jacente et d'analyser les régularités cachées et non linéarités de chaque fonction modale intrinsèque.

Par la décroissance du spectre d'un bruit rayonné de bateau, des similarités avec un mouvement Brownien fractionnaire sont observables [Xiang_1999]. Le bruit rayonné de bateaux peut être caractérisé par des paramètres fractals. Ainsi [Yang_2000] montre que l'affichage en tridimensionnel de la déviation standard des séquences différentielles et des dimensions fractales (*Blanket-covering dimension*) des sections 1 et 3 permettent de séparer les classes de bateaux.

L'utilisation de paramètres chaotiques permet d'extraire de l'information de régularités et non-linéarités contenues dans la signature acoustique des bateaux. [Yang_2013] intègre la série temporelle dans un espace de grande dimension en utilisant la reconstruction de l'espace d'état et estime le plus grand exposant de Lyapunov pour chaque état de l'évolution. Les résultats de la classification chaotique montrent une complémentarité entre l'analyse chaotique et l'analyse spectrale. La comparaison des résultats de ces deux méthodes montre une amélioration de la classification pour la moitié des 6 catégories de bateaux étudiés, mais aussi une dégrade pour les autres catégories.

L'analyse cepstrale permet de réduire l'influence des distorsions induites par le canal de propagation, en séparant un signal source de la réponse du canal : [Das_2010] a montré par simulation de bruit rayonné de bateaux que le cepstre du signal source et la réponse du canal se séparent en grande partie vers les indices inférieurs et supérieurs du cepstre. Ainsi, [Das_2013] utilise 32 paramètres de classification des bateaux correspondant aux coefficients du cepstre, regroupés par bandes uniformes de 16 coefficients, ainsi que 32 paramètres obtenus par la moyenne temporelle des paramètres précédents. Les performances de cette méthode cepstrale sont évaluées en comparant les résultats à ceux obtenus en utilisant 8 paramètres spectraux : le nombre de raies spectrales, l'intervalle de fréquence moyen entre deux raies spectrales adjacentes, la fréquence correspondant au maximum de spectre, le niveau moyen des raies spectrales, la fréquence pour laquelle l'énergie bande large est maximale, la pente formée par le spectre bande large, le *roll-off* spectral, la centroïde spectrale. Le classifieur basé sur les paramètres cepstraux moyennés permet une meilleure classification. L'analyse a été réalisée sur des données acquises dans un environnement petit fond (30 m de fond). De même, [Santos-Domínguez_2016] réalise une détection et une classification des bateaux de la base de données ShipsEar par estimation de coefficients cepstraux.

Une modification de la distribution du signal est observée lors d'un passage de bateau : l'analyse de la divergence de kullback permet à [Pradhan_2015] de modéliser le bruit ambiant par une distribution de Weibull et le bruit du passage de bateaux par un modèle gaussien dont les paramètres dépendent de la classe de bateau. Le caractère gaussien du bruit ambiant a toutefois été mis en avant par [Das_2011]. [Pradhan_2017] réalise la détection de bateaux en appliquant le critère de Neyman Pearson au logarithme du rapport de vraisemblance entre les deux distributions.

6.2.2 Dans la communauté d'acoustique aérienne (véhicules motorisés)

La Table 27 présente une synthèse des différentes méthodes de détection et de classification de véhicules motorisés présentes dans la littérature d'acoustique aérienne. Ces méthodes visent à l'identification de véhicules terrestres, voitures et deux roues motorisées, ainsi que les véhicules aériens. [Quach_1999] propose une classification des véhicules aériens en trois catégories acoustiques : les avions à hélice, les avions à réaction et les hélicoptères.

Domaine d'étude	Précision sur la méthode, les paramètres	Type de source détecté	Source
Analyse temporelle	Time Encoded Signal Processing and Recognition (TESPAR)	Véhicules	[Mazarakis_2007]
	Paramètres temporels (Zero-crossing rate)	Véhicules	[Starzacher_2009, Basavaraj_2009]
Analyse spectrale	Détection d'harmonique, analyse des harmoniques, Harmonique Line Association	Avions Véhicules	[Succi_1999, Quach_1999, Sutin_2013b, Tong_2013, Hohil_2003, Guo_2008]
	Analyse du Doppler (avec un prérequis sur la vitesse ciblée)	Avions et voitures à grande vitesse	[Pourmohammad_2013]
	Estimation de la distance Euclidienne entre la PSD et la PSD d'un modèle	Véhicules	[Mairaj_2011]
	Paramètres spectraux : centroid, bandwidth, roll-off point, flux, etc.	Véhicules	[Starzacher_2009, Basavaraj_2009]
	Analyse des moments de la PSD (moyenne, variance, kurtosis skewness)	Véhicules	[Thomas_1972]
Modélisation paramétrique	Analyse par codage linéaire prédictif (<i>Linear predictive coding</i>)	Véhicules	[Nooralahiyan_1998]
	Modélisation autorégressive AR	Véhicules	[Li_2002]
	Time Varying Autoregressive (TVAR)	Véhicules	[Liu_1999, Kie_1999]
Analyse par ondelette	Transformation en ondelette discrète	Véhicules	[Choe_1996, Maciejewski_1997, Khandoker_2007]
	Transformée en paquet d'ondelette	Véhicules	[Averbuch_2001, Amir_2009, Averbuch_2009]
	Estimation de la distance Euclidienne entre la transformée en ondelette et celle de modèle	Véhicules à deux roues	[Anami_2011]
Analyse énergétique	Ratio de l'énergie au-dessus et en dessous de 50 Hz	Avions et véhicules	[Quach_1999]
	Energie et différence d'énergie dans des bandes spécifiques : 10-50 Hz, 50-100 Hz, 100-200Hz et 200-300Hz // 10-200 Hz et 200-400Hz	Avions et véhicules	[Quach_1999, Nielsen_2009, Sutin_2013b]
	Energie de l'enveloppe du signal	Véhicules	[Somkiat_1997]
Décomposition modal	Estimation des fonctions modales intrinsèques par modélisation AR	Scoters	[Cheng_2008]
Analyse Cepstrale	Coefficients cepstraux	Véhicules	[Roberts_2001, Starzacher_2009]
	Mel-frequency cepstral coefficients	Véhicules	[Munich_2004, Qi_2006, Kim_2009]

Table 27 : Synthèse des méthodes utilisées dans la communauté d'acoustiques aérienne pour la détection et la classification de véhicule motorisé terrien et aérien

6.2.3 Dans la communauté de traitement audio (parole et musical)

Les recherches de classification de sons audio (vocaux ou musicaux) se regroupent en plusieurs catégories telles que la reconnaissance vocale, la reconnaissance entre la musique et le parler, la reconnaissance d'instruments de musique et la classification de genres musicaux. Indétrônable, les coefficients de Mel (MFCC) sont largement utilisés en reconnaissance vocale. Différentes études ont montré l'inefficacité de ces paramètres pour la classification de nombreuses classes telles que les sons instrumentaux ou musicaux. Dans la communauté de la recherche d'information musicale, l'information portée par un extrait audio est analysée selon trois aspects correspondant, selon [Scaringella_2006]:

- **Au timbre.** La notion de timbre fait appel à notre perception du son et aux caractéristiques perceptuelles qui permettent de différencier deux sons de même ton et de même volume. Cette notion de timbre est couramment exploitée dans la littérature par le suivi temporel de paramètres descriptifs. L'évolution de ce paramètre est caractérisée par sa moyenne, sa variance [Tzanetakis_2002] et la valeur du pic prédominant [Garcia_2006].
- **Au rythme.** La notion de rythme réfère à une régularité temporelle et permet de caractériser l'ensemble des aspects temporels d'un extrait musical. Le rythme est peu souvent exploité dans la littérature pour un objectif de classification.
- **A la mélodie et les harmoniques.** Dans le domaine musical, les harmoniques, aussi appelées éléments verticaux, caractérisent les *hauteurs* et *accords*, réels ou implicites, présents dans une musique. En raison du mélange polyphonique, plusieurs fréquences fondamentales sont présentes dans le signal. Par opposition à ces harmoniques, la mélodie, appelée l'élément horizontal, représente un ensemble d'éléments perçus comme une seule entité.

La Figure 63 présente différents paramètres et méthodes de détection et de classification d'extraits audio utilisés dans la communauté de traitement de la parole et de la recherche d'information musicale.

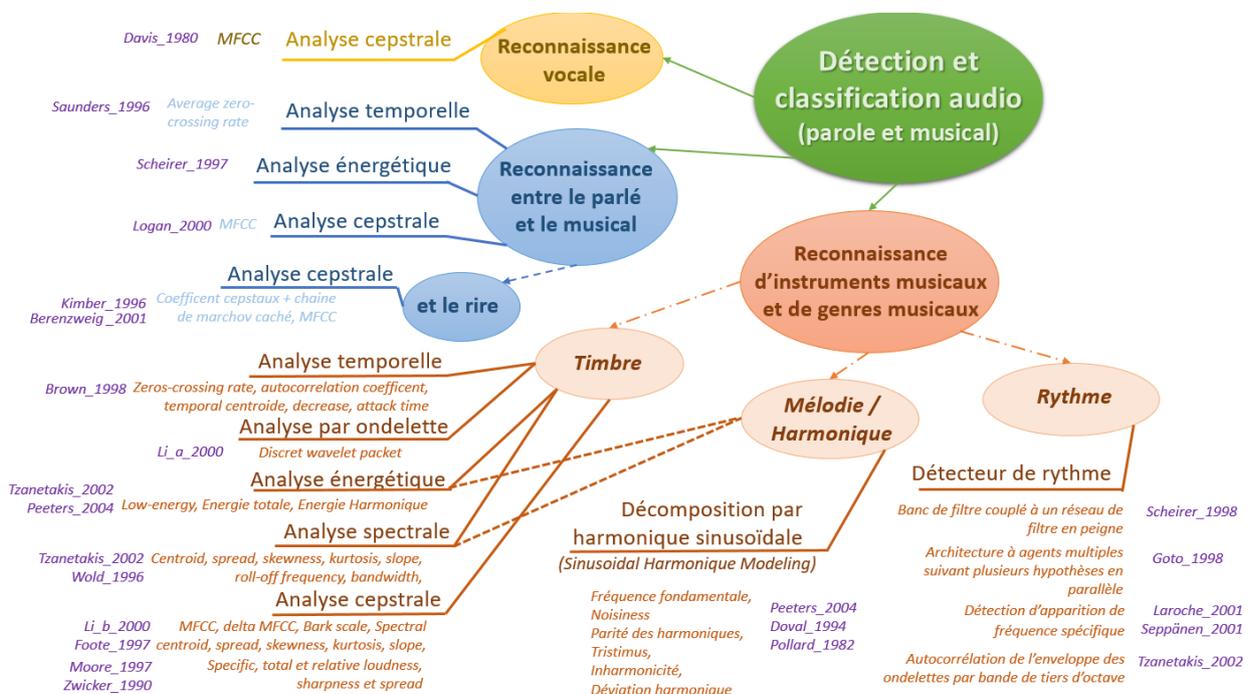


Figure 63 : Paramètres et méthodes de détection et de classifications utilisées dans la communauté de traitement de parole et de la classification de genres musicaux

6.3 Présentation de la base de données et des espaces de représentation

6.3.1 Présentation des bases de données acoustiques

La création d'une base de données de bruits rayonnés de bateaux avec identification visuelle de chaque bateau a donc été réalisée par annotation manuelle des spectrogrammes de la base de données de Juillet 2016 et analyse des photographies. Pour chaque séquence sélectionnée, les données photographiques permettent d'identifier le bateau à proximité de l'enregistreur lors du temps CPA annoté et de connaître l'état du trafic maritime durant ce passage. Cette association des photographies individuelles aux signatures de bateaux permet de créer d'une base de données avec vérité terrain de 598 passages de bateaux identifiés. Cette base de données permet alors d'identifier la signature acoustique d'un peu moins d'un quart des bateaux traversant la baie (22,2 %) et représente plus de la moitié du nombre de passages de bateaux passant à proximité de la pointe de la Revellata (53,7 %).

Pour caractériser chaque passage de bateau issu de la base de données avec vérité terrain, un ensemble de paramètres est annoté. Le modèle de Ross [Ross_1976] permet de modéliser le bruit rayonné d'un navire en considérant la vitesse et la longueur du bateau. D'autres paramètres sont couramment utilisés dans la littérature pour caractériser le bruit rayonné des bateaux, principalement de type navire de commerce. Ainsi, [Allen_2012], [McKenna_2011] et [Simard_2016a] utilisent les informations fournies par les données AIS des bateaux pour estimer différents paramètres : la distance au CPA, l'angle formé entre l'enregistreur et le bateau, la vitesse du bateau, son tirant d'eau, sa longueur et son âge depuis la construction. Le paramètre jauge brute, correspondant à la capacité de transport du navire est renseigné par [Allen_2012] et [McKenna_2011], [Simard_2016a] considère le paramètre largeur du bateau et [Allen_2012] s'est intéressé aux informations liées à la motorisation du bateau : le type de propulsion et la puissance du moteur. Les paramètres tirant d'eau et jauge brute sont spécifiques aux bateaux de commerce et ne peuvent être appliqués à une flottille d'embarcations côtières.

Les paramètres choisis pour cette thèse sont classés en deux catégories : les paramètres physiques directement liés aux bateaux et les paramètres contextuels liés aux conditions de navigation lors de son passage. Les paramètres physiques considérés sont la longueur du bateau, le type de propulsion principale, le type de moteur et la catégorie du bateau. Le paramètre *type de propulsion principale* permet de séparer en trois catégories ces bateaux : les bateaux utilisant une propulsion jet, dans notre cas cette catégorie se résume aux motomarines, les bateaux possédant une propulsion à hélice et les voiliers fonctionnant au moteur. Le paramètre *type de moteur* permet de différencier les bateaux possédant un moteur hors-bord (moteur non intégré au bateau et composé d'un seul bloc comprenant la transmission et l'hélice), des bateaux ayant un moteur intégré de type in-bord ou semi hors-bord. Ces éléments ont été obtenus grâce aux photographies individuelles de chaque bateau. Les bateaux à propulsion par hélice sont classés en 8 catégories : les semi-rigides, les open-coques, les proues fermées, les pêches-promenades, les vedettes, les yachts (moyens et grands) et les bateaux navettes. La Figure 64 présente un exemple de photographie pour chaque catégorie de bateaux considérée.



Figure 64 : Exemple de catégories de bateaux

D'autres paramètres permettent de caractériser les conditions de navigation lorsque le bateau passe à proximité de l'enregistreur acoustique. Ces paramètres contextuels sont la distance entre l'enregistreur et le bateau, l'angle formé entre le bateau et l'enregistreur, la vitesse et la variation de vitesse du bateau ainsi que la trajectoire principale du bateau. Le paramètre variation de vitesse permet de renseigner sur le changement marqué de régime moteur du bateau à proximité de l'enregistreur, et donc de savoir si le bateau était dans une phase d'accélération, de ralentissement ou avait une vitesse constante. Les bateaux passant à proximité de l'enregistreur se concentrent autour de trois routes principales : la route *Revellata-Citadelle*, la route *Revellata-Anse de l'Oscelluccia* et la route *Revellata-Golfe de la Revellata*. Le paramètre trajectoire principale du bateau permet donc d'identifier la route et la direction prise par le bateau. L'enregistreur étant situé à proximité de la pointe de la Revellata, l'identification de la route empruntée permet de renseigner sur la courbure de la trajectoire prise par le bateau.

En l'absence de données AIS permettant d'identifier et de suivre chaque bateau, ces paramètres contextuels, ainsi que la longueur du bateau ont été obtenus par annotation manuelle des images GoPro® et l'utilisation des fonctions permettant de relier ces images aux coordonnées GPS de la baie. Pour faciliter cette annotation, un algorithme dédié a été créé sous python. Cet algorithme permet de récupérer les indices des pixels pointés lors d'un clic de souris sur l'image et au choix, d'afficher la distance entre le pixel pointé et la position de l'enregistreur, de calculer une distance entre deux pixels pointés, d'enregistrer les positions GPS d'un pixel et de faire un suivi de position entre un ensemble d'images consécutives. Afin de limiter les incertitudes de position lors du suivi de position, quatre positions sont annotées pour chaque bateau : une position à la pointe avant du bateau, une position au milieu du bateau et deux positions à l'arrière du bateau. Cette dernière fonction permet alors d'estimer la vitesse du bateau et d'extraire sa distance au plus près par interpolation des coordonnées.

6.3.2 Durée d'analyse pour l'ensemble des domaines

Le chapitre 1 a présenté les effets subits par le bruit rayonné des bateaux lors de la propagation sous l'eau (interférence, Doppler). Pour une analyse indépendante de ces phénomènes de propagation, chaque passage de bateau est segmenté en 10 extraits de 10 secondes, recouvrant 1 minute autour du CPA. Ce choix de durée d'analyse est issu d'un compromis entre une durée d'intégration courte, assurant la stabilité des raies, la faible influence du Doppler, et un faible temps avant l'identification de la source et une durée d'intégration longue, permettant d'augmenter le gain de traitement et d'obtenir plus d'informations spectrales sur la présence des raies.

6.3.3 Présentation des espaces de représentation

La revue bibliographique a montré que l'analyse dans différents espaces de représentation est rarement réalisée et, lorsque c'est le cas, elle est utilisée pour comparer les performances des algorithmes. Une analyse conjointe dans différents espaces de représentation apparaît dans quelques travaux : [Lourens_1987] (démodulation et modélisation spectrale) et [Yang_2002] (analyse fractals, ondelette et spectrale). Dans cette thèse, quatre espaces de représentation, fortement présents dans la revue présentée, seront étudiés conjointement : l'analyse spectrale, l'analyse DEMON, l'analyse cepstrale et l'analyse des coefficients de Mel MFCC. Ces méthodes sont présentées en Annexe 3 p 235.

Le bruit rayonné par les bateaux était composé d'un bruit large bande, auquel s'ajoute la présence de raie fréquentielle. L'analyse spectrale s'est donc naturellement imposée pour l'étude de ce type de source. Pour cette thèse, l'estimation de la PSD est faite en utilisant la méthode de Welch avec une fenêtre d'apodisation de type Hamming. La résolution fréquentielle finale est de 1 Hz.

L'utilisation de l'analyse DEMON est incontournable lors de caractérisation des bruits rayonnés par les bateaux. En effet, le bruit rayonné par les bateaux est rythmé par la rotation des pales d'hélice et cette rotation crée une périodicité au sein de l'enveloppe [Nielsen_1999]. L'analyse DEMON permet alors d'extraire l'information sur la périodicité liée au système de propulsion. Cette méthode dépend de plusieurs paramètres d'entrée : le filtre passe-bande et la fréquence de sous-échantillonnage lors du calcul RMS. La sélection de la bande de fréquence du filtre passe-bande est déterminante : cette bande doit correspondre à la bosse de bruit d'hélice du signal. [Chung_2011] choisi d'étudier les modulations présentes dans la bande 10 kHz-90 kHz afin de s'affranchir du bruit ambiant présent en basse fréquence, alors que [DeMoura_2011] recommande de filtrer au plus proche de la bosse de bruit, entre une centaine de Hertz à un millier de Hertz, afin de maximiser l'information portée par la modulation le bateau. Le choix de la fréquence de sous échantillonnage doit alors être en accord avec la bande fréquentielle finale que l'on souhaite analyser [DeMoura_2011]. Ainsi, [Chung_2011] choisit d'étudier les modulations à une fréquence d'échantillonnage de 2 kHz. Dans le cas présent, cette analyse est alors réalisée sur les 10 secondes de signal. Le filtre passe-bande utilisé est le même pour l'ensemble des séquences et correspond à un *Butterworth* d'ordre 4 entre 100 Hz et 1.5 kHz. Les données sont sous échantillonnées à une fréquence de 2,441 kHz et le filtrage passe haut final est réalisé en considérant une fréquence de coupure de 5 Hz. L'analyse spectrale est ensuite réalisée en estimant la densité spectrale de puissance par la méthode de Welch.

[Das_2011] à montrer l'intérêt de l'analyse cepstrale appliquée à l'étude des bruits rayonnés par les bateaux. Ce type d'analyse permet une simplification lors de la dissociation d'un bruit source et du canal qui l'entoure. Le **cepstre** est calculé à partir la transformée de Fourier du signal en utilisant la formule présentée dans l'annexe 3. L'étude est réalisée pour des fréquences inférieures à 2 kHz à une fréquence d'échantillonnage de 4.8 kHz. La transformée de Fourier discrète réelle est directement appliquée aux 10 secondes de signal. L'application de la fonction logarithmique puis de la transformée de Fourier inverse réelle permet d'obtenir le cepstre du signal.

L'analyse des coefficients MFCC est couramment utilisée dans les problèmes de classification audio. En effet, les coefficients de Mel MFCC permettent une représentation du spectre selon une échelle perceptive représentative de l'audition humaine. Il est à noter qu'avec un peu d'entraînement, l'oreille humaine arrive à discerner les différences entre les bruits rayonnés par divers types d'embarcations. Ainsi, la classification sur l'audio est l'un des premiers critères utilisés par les oreilles d'or du Centre d'Interprétation et de Reconnaissance Acoustique, avant l'analyse DEMON et des spectrogrammes. Dans le cas présent, l'étude est réalisée en basse fréquence, entre 10 Hz et 1.5 kHz. 100 filtres triangulaires sont alors définis en un espacement logarithmique selon l'échelle de Mel. L'estimation des MFCC est réalisée en utilisant la librairie *python_speech_features* en Python.

6.3.4 Méthode d'analyse

Les résultats présentés dans la section suivante ont été obtenus à partir d'une analyse visuelle et qualitative des bruits rayonnés par les bateaux. Les bateaux ont été ordonnés par catégories. Pour chaque espace de représentation, un affichage de l'ensemble des bateaux associés à chaque catégorie est réalisé, avec identification des autres paramètres physiques et contextuels du bateau : vitesse, longueur, distance au CPA et type de moteur (in ou hors-bord). Cette étude qualitative est complétée par une annotation manuelle sur l'ensemble des bateaux pour certaines caractéristiques présentées ci-dessous (fréquence de la bosse de cavitation, intervalle entre harmonique, etc.).

De plus, la fonction de densité de probabilité normalisée est estimée pour chaque espace de représentation. Cette méthode s'inspire de la visualisation tridimensionnelle proposée par [Merchant_2013, Erbe_2016] en renseignant sur la densité de probabilité de la densité spectrale de puissance, du spectre de puissance, du cepstre ou des coefficients MFCC, en fonction de la fréquence, de la fréquence ou de l'indice du filtre MFCC. Le spectre / cepstre / coefficient MFCC médian est alors représenté, ainsi que la valeur médian +/- l'écart type. Les bateaux sont ainsi classés par catégorie. Plus la couleur est chaude, plus la densité de probabilité est importante.

6.4 Visualisation des bruits rayonnés à travers différents espaces de représentation

6.4.1 Représentation dans le domaine spectrale

L'essentiel de l'information large bande discriminante est présente en dessous de 1 kHz et jusqu'à 5 kHz pour les raies. A partir de 1,3 kHz, les oscillations marquées de la PSD des grandes embarcations (navettes, grand/moyen yacht) sont dues aux effets de propagation (large miroir de Lloyds). Ce phénomène s'amointrit fortement pour les petites embarcations dû au choix du temps d'intégration.

L'ensemble des PSD présente des caractéristiques communes, telles que la présence d'une bosse de bruit en basse-fréquences. Cette bosse de bruit s'étend de 40 à 70 Hz jusqu'à 400 Hz à 1kHz et atteint un maximum entre 170 Hz et 350 Hz. Pour de petites embarcations, le maximum semble globalement plus élevé en fréquence : entre 150 et 230 Hz pour navette et grand/moyen yacht contre un maximum entre 200 Hz et 350 Hz pour open-coque, proue fermée et semi-rigide. De même, la bosse de bruit semble se prolonger plus loin en fréquence pour les petites embarcations ou quand la vitesse du bateau augmente. Cette observation est liée aux oscillations, induites par la présence du miroir de Lloyds, moins marquées pour les petites embarcations. Cette bosse de bruit prend une forme moins étalée qualifiée de « triangulaire » pour les grandes embarcations à faible vitesse, lorsque la taille de l'embarcation diminue ou pour les embarcations dotées d'un moteur hors bords pour les open-coques. Une illustration de cette forme triangulaire est présentée dans la Figure 65. Un ensemble de raies se superpose à la bosse de bruit basse fréquence. Pour les grandes embarcations, ces raies sont davantage positionnées sur la pente montante de la bosse de bruit. D'une à trois raies fortement énergétiques apparaissent sur cette pente. Des peignes d'harmoniques peu marqués sont à noter. L'espacement entre les harmoniques est de l'ordre de 10 Hz. Ces observations se vérifient pour des bateaux dont la vitesse est supérieure à 10 m/s. Ce peigne d'harmoniques devient plus marqué lorsque la taille du bateau diminue. Cependant, **la présence du peigne d'harmonique ou l'organisation des raies n'est pas systématique pour l'ensemble des petites embarcations et est non liée à une vitesse ou un type de moteur** (10/24 vedettes). L'intervalle entre les raies augmente à 15 / 30 Hz, voir prend des valeurs encore plus grandes pour certains semi-rigides (60 Hz). Ces harmoniques ressortent d'avantage du bruit large bande et se localisent sur la pente descendante de la bosse de bruit pour de bateau rapide ou proche de l'enregistreur.

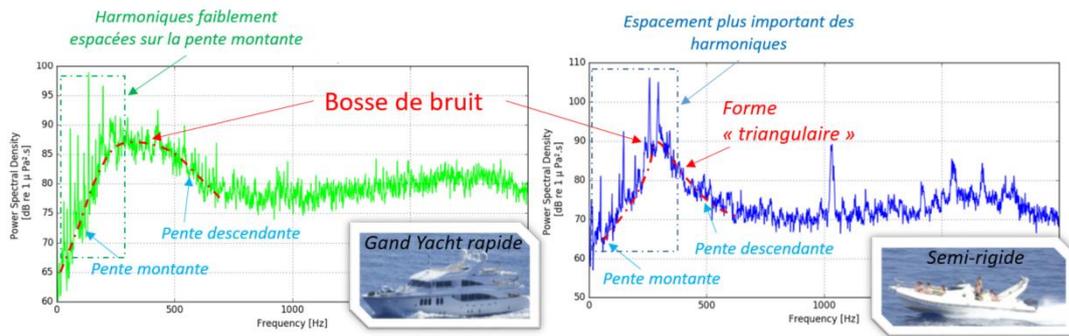


Figure 65 : Modification de la forme de la bosse de bruit et de l'espacement des harmoniques sur la bosse de bruit

La visualisation par catégorie de bateaux montre une unité au sein des grandes embarcations et une forte **diversité pour les petites embarcations, ceci par la présence de raies** hors bosse de bruit pour un sous-ensemble de chaque catégorie. Selon les bateaux, ces raies (isolées, nombreuses et désordonnées), forment un ensemble de 2 à 4 harmoniques successives entre 500 Hz et 2 kHz, ou un peigne d'harmoniques fortement énergétique entre 2 kHz et 10 kHz. Dans le dernier cas, l'espacement entre les raies est compris entre 700 Hz et 1200 Hz (vedettes, pêches-plaisance et proues fermées, zodiacs) ou 500 Hz et 800 Hz (open-coques). Cette répartition des raies n'est **pas liée à la vitesse du bateau ou au type de moteur (in/hors bords)**. La catégorie **semi-rigide présente aussi des disparités en termes de bosse de bruit** : fort élargissement ou amincissement de la bosse de bruit, apparition d'une seconde bosse de bruit entre 1,1 kHz et 5kHz non liée aux effets de propagation.

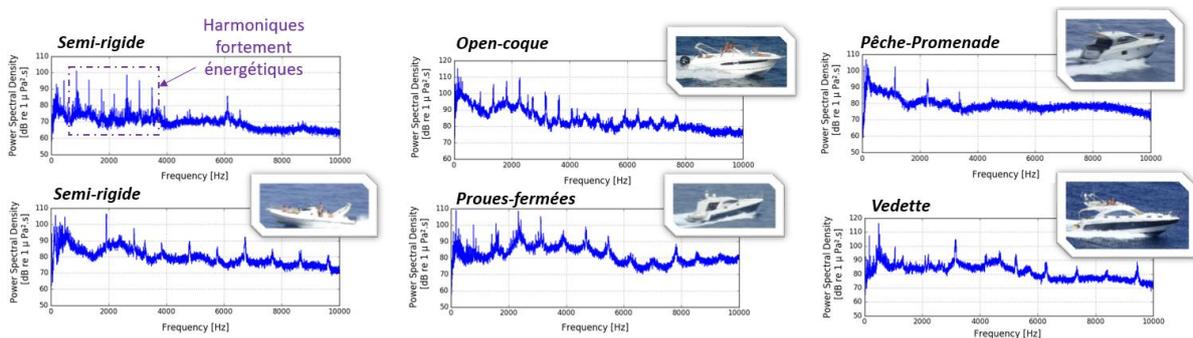


Figure 66 : PSD de l'ensemble des sessions marquées par d'harmoniques fortement marquées hors de la bosse de bruit

Une catégorie de bateau possède des caractéristiques spectrales permettant une différenciation avec les autres catégories de bateaux : les navettes touristiques côtières. La présence d'auxiliaire à bord de ces bateaux se traduit par l'apparition d'une à deux raies solitaires fortement énergétique à fréquence fixe et indépendante de la vitesse du bateau entre 900 Hz et 1700 Hz. La catégorie de navettes de touristes est composée de 2 bateaux dont l'identification individuelle est réalisée grâce à ces raies auxiliaires et confirmée par identification photographique : le premier bateau possède deux raies à 1330 Hz et 1700 Hz, et le deuxième bateau possède une raie à 945 Hz. De telles raies auxiliaires isolées et fortement énergétiques sont observées entre 500 Hz et 1,7 kHz pour les grandes embarcations (6/11 pour les grands yachts – 6/15 pour les moyens yachts) (Figure 67). De même, certaines petites embarcations possèdent aussi des raies fortement énergétiques au-dessus de 1 kHz.

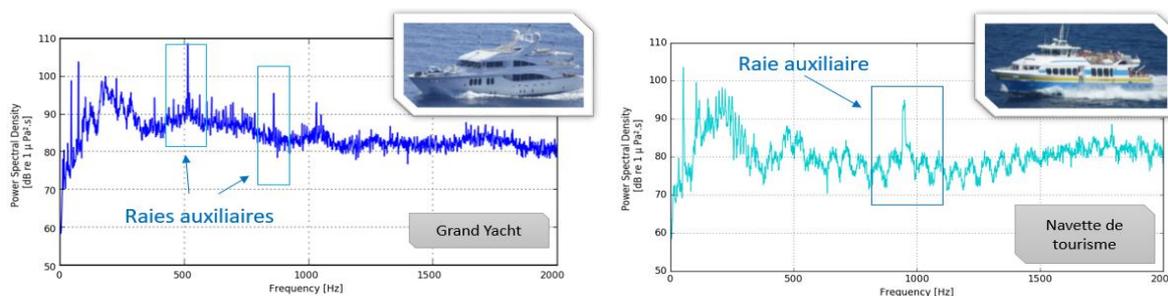


Figure 67 : Raies auxiliaires sur les PSD de navettes et de grandes embarcations

La Figure 68 présente la visualisation tridimensionnelle de la fonction de densité de probabilité de la PSD, ramené à 1 m en utilisant une propagation en $15\log_{10}(d)$ en fonction de la fréquence. La courbe rouge représente le spectre médian, et les courbes noires le spectre médian +/- l'écart type. Cette figure permet d'observer la bosse de bruit et son positionnement en fréquence en fonction du type de catégorie, mais il n'est pas facile de visualiser l'aspect dit « triangulaire ». Exceptés pour les navettes, composées de deux bateaux allant à des allures proches, la visualisation tridimensionnelle ne permet pas d'observer la présence de raies ou d'harmoniques due au fait que les fréquences associées à ces raies sont différentes pour chaque embarcation. Ces raies se traduisent un fort écart type.

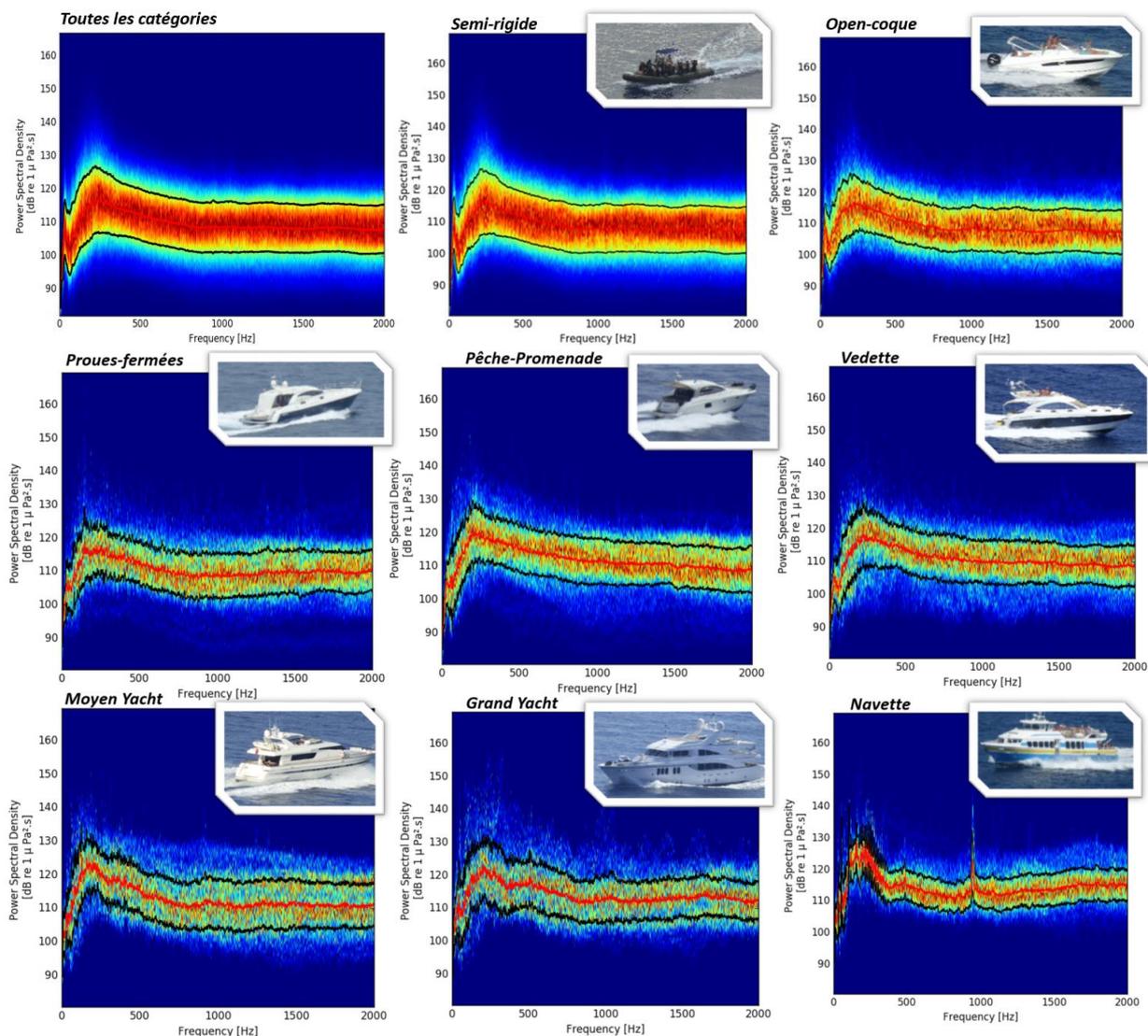


Figure 68 : Fonctions de densité de probabilité des PDF des niveaux ramenés à 1 m

6.4.2 Analyse DEMON

Cette analyse a été réalisée en étudiant les bandes 100 Hz-1,5 kHz et 1,5 kHz-5 kHz. Les résultats obtenus par filtrage dans la bande 1,5 kHz-5 kHz sont encore plus contrastés et présentent plus de diversité intra-catégorie. Seule l'analyse dans la bande de fréquence 100 Hz - 1,5 kHz est retenue pour la suite.

L'affichage spectral de l'analyse DEMON présente plus de **diversité intra-catégorie** que l'analyse spectrale. Plusieurs types de spectres DEMON sont obtenus pour l'ensemble des catégories de bateaux : des spectres de raies et des spectres fortement « bruités ». Les spectres de raies ont différentes formes : présence de raies isolées, présence de raies non organisées, présence de peigne d'harmoniques. Pour pouvoir posséder ce type de spectre, les embarcations doivent caviter et présenter des vitesses stables. Dans le cas contraire, un aspect « bruité » des spectres est observable. Ainsi, pour les grandes embarcations (navette, grand et médian yacht) 9 sur 43 bateaux sont concernés, dont la moitié sont des yachts médians. Ces bateaux ont soit une vitesse faible (4 m/s) soit un éloignement plus conséquent dépendant de la vitesse : de 200 m (pour une vitesse de 7 m/s) à 350 m (pour une vitesse de 12 m/s) au CPA. L'ensemble des bateaux répondant à ces caractéristiques ne possède pas obligatoirement ce type de spectre. Pour les petites embarcations, aucune conclusion sur les liens avec des paramètres externes n'est observable.

Une certaine unité est remarquée parmi les spectres de raies des grandes embarcations. Ils sont principalement composés de 4 à 12 harmoniques positionnés en basse fréquence : l'essentiel de l'information est présente en dessous de 70 Hz à 120 Hz pour de grands yachts, 150 Hz pour les navettes, 70 Hz à 150 Hz pour les yachts médians (Figure 69). La raie la plus énergétique est majoritairement la 1^{ère} raie ou à une fréquence inférieure à 75 Hz. Ces harmoniques ont un espacement régulier : entre 5-13 Hz (grand Yacht) 12 - 14Hz (navettes) et 10 - 19 Hz (médian yacht). Hormis les spectres bruités, seul 3 spectres ne respectent pas ces caractéristiques. L'intervalle entre les harmoniques est différent pour les petites embarcations : seul 23 sur 506 petites embarcations possèdent un espacement régulier inférieure à 20 Hz. Contrairement à la représentation spectrale, l'identification des navettes de tourisme est moins intuitive.

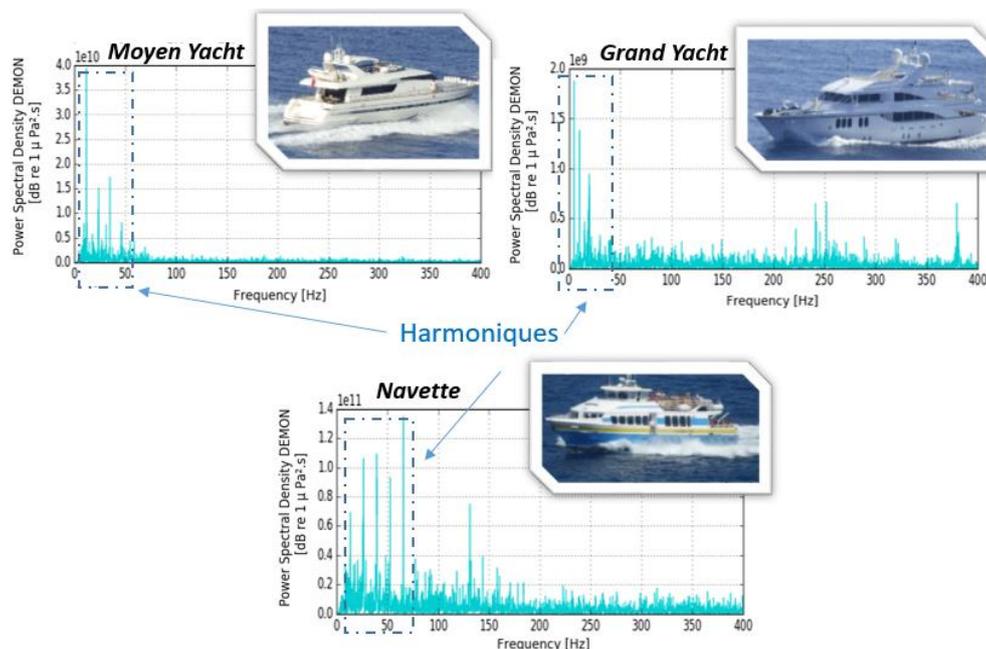


Figure 69 : Exemple de spectres DEMON pour les navettes, moyen et grand yacht

La **diversité des spectres augmente lorsque la taille de l'embarcation diminue**. Bien que 16 des 21 séquences de proues fermées soient de constitution en harmoniques dont l'espacement est supérieur à 20 Hz, cette forme est moins répandue pour les petites embarcations : 48/345 semi-rigides, 41/90 open-coques et 13 / 28 pêche-plaisances. L'énergie liée à ces raies est répartie sur une bande fréquentielle plus grande. D'avantage de spectres ne présentant qu'une seule raie sont visibles indépendamment de la vitesse (de 3 et 10 m/s), de la distance du bateau et de son type de moteur (in-hors bords) : 17 pour les open coques et 51 semi-rigides. Les raies présentes dans les spectres sont moins bien organisées, particulièrement pour la catégorie semi-rigide (Figure 70). La répartition de l'énergie dans la bande de fréquence est variable pour les semi-rigide.

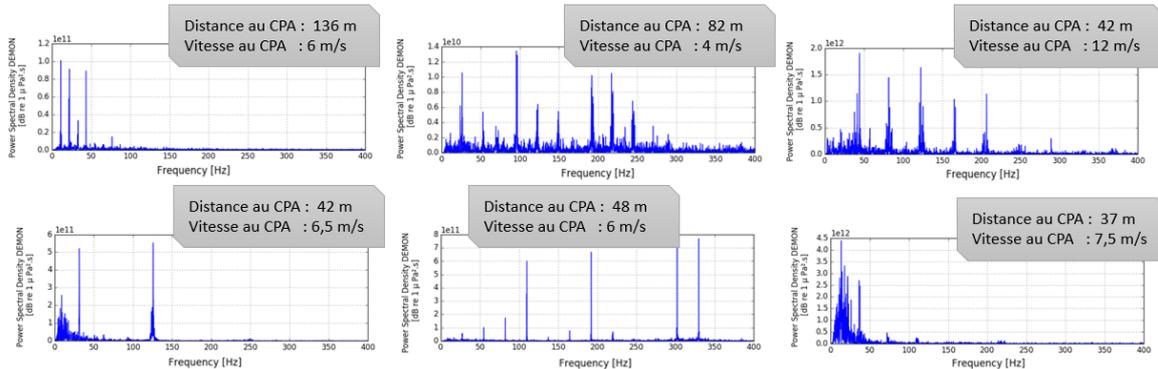


Figure 70 : Variété de spectres DEMON pour les semi-rigides

La Figure 71 présente la visualisation tridimensionnelle de la fonction de densité de probabilité du spectre DEMON en fonction de la fréquence. Comme dans le cas de l'analyse spectrale, cette visualisation permet difficilement d'observer la présence de raies éléments clés de l'analyse DEMON.

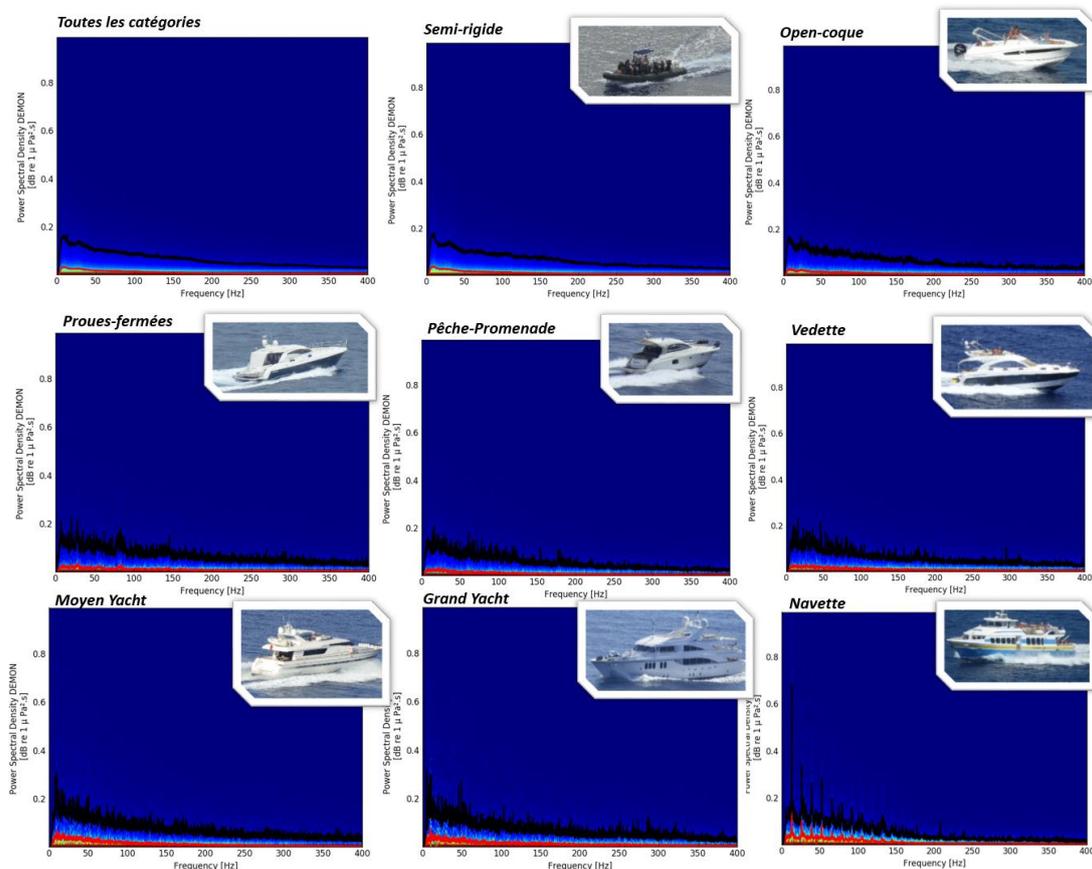


Figure 71 : Fonctions de densité de probabilité du spectre DEMON normalisée

L'estimation de la PSD du signal obtenu après analyse DEMON permet en théorie d'identifier deux raies caractéristiques [Lourens_1988, Odgen_2011] : la raie correspondant au *Shaft Rate* (la raie de plus faible fréquence) et la raie correspondant *Blade Rate* (la raie la plus énergétique). Le ratio des fréquences de ces raies permet d'identifier le nombre de pales de l'hélice. Ainsi, lors de l'analyse DEMON, la présence d'un peigne d'harmonique dont l'espacement informe sur le nombre de pale est attendue et dont les raies les plus marquées correspondent à des multiples du *Shaft* ou *Blade* rate. L'analyse des photographies permet d'identifier le moteur des embarcations hors-bords. Les propriétés de l'analyse DEMON sont donc testées sur ce type d'embarcations. Des difficultés d'interprétation du spectre sont alors rencontrées pour de nombreuses embarcations hors-bords. Le cas présenté ci-dessous illustre ces difficultés. La Figure 72 présente les spectres DEMON sur différentes bandes fréquentielles. Ces spectres sont marqués par 3 raies principales (8.1 Hz, 31.6 Hz et 125.8 Hz) grossièrement reliées entre elles par un rapport 4. En revanche, l'analyse photographique montre que le moteur utilisé possède seulement 3 pâles. L'analyse sur la bande 0-100 Hz montre la présence de 4 multiples avec fondamentale de 31.6 Hz (en orange) ; cette fréquence est trop élevée pour correspondre à un *Shaft Rate* en vue de la faible vitesse du bateau. A supposer que cette fréquence corresponde au *Blade Rate*, la fréquence fondamentale sera alors de 10.53 Hz et explique la présence de la raie à 41.7 Hz, bien que aucune raie à 10.53 Hz et 21 Hz ne soit observées. Aucun lien entre les raies observées entre 0-20 Hz et les autres raies ne correspondant à une logique directe. Sans information sur le bateau, dans ce cas présent, **l'interprétation du spectre reste difficile et facilement sujette à des erreurs**. Pour cet extrait, aucune autre embarcation n'est présente dans la baie et le bateau appartient à STARESO, une vérification des caractéristiques a pu être réalisée.

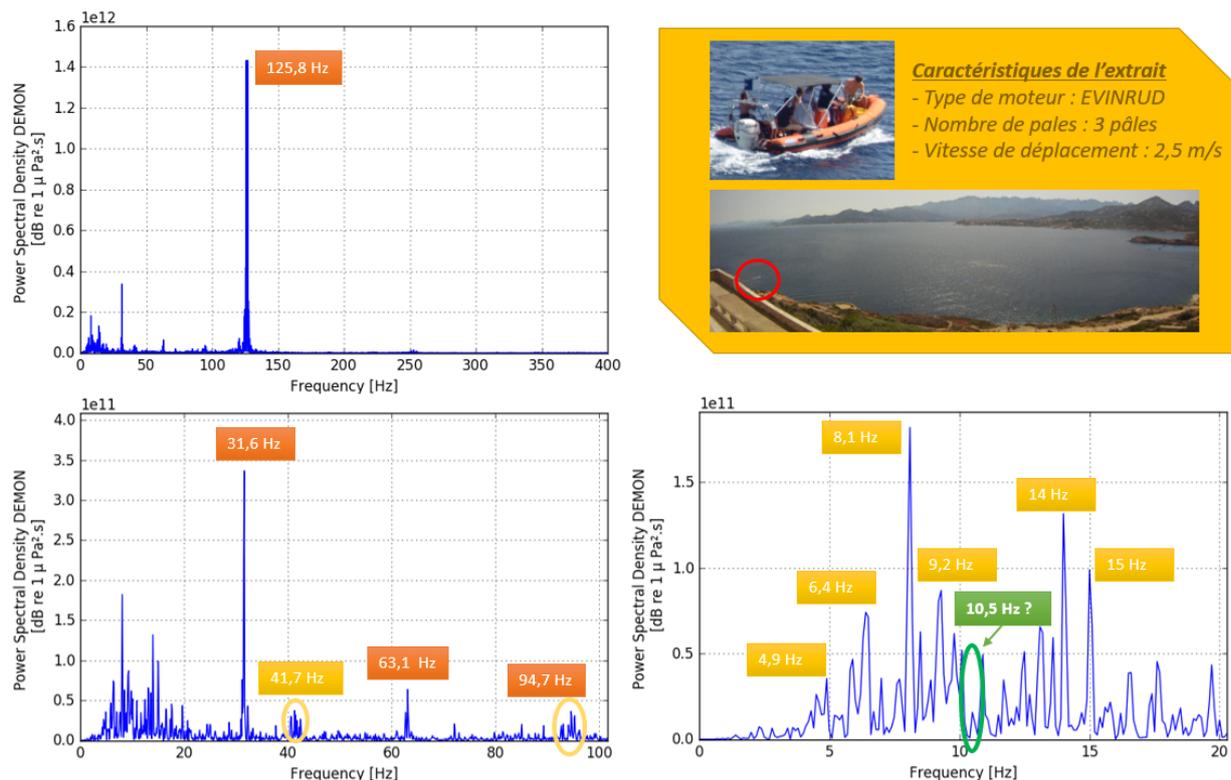


Figure 72: Difficulté lors de l'identification des caractéristiques de propulsion par analyse DEMON

6.4.3 Analyse du cepstre

L'affichage des cepstres montre que pour la bande de quéfrence 0 à 600 secondes, les effets de propagation sont peu influents : les cepstres d'un même passage de bateau présentent les mêmes variations malgré l'éloignement temporel par rapport au passage au CPA. La Figure 73 représente le ratio entre les variations observées à une quéfrence donnée pour un même passage de bateaux et celles observées pour l'ensemble de la flottille. La valeur médiane de ce ratio est de 0.4.

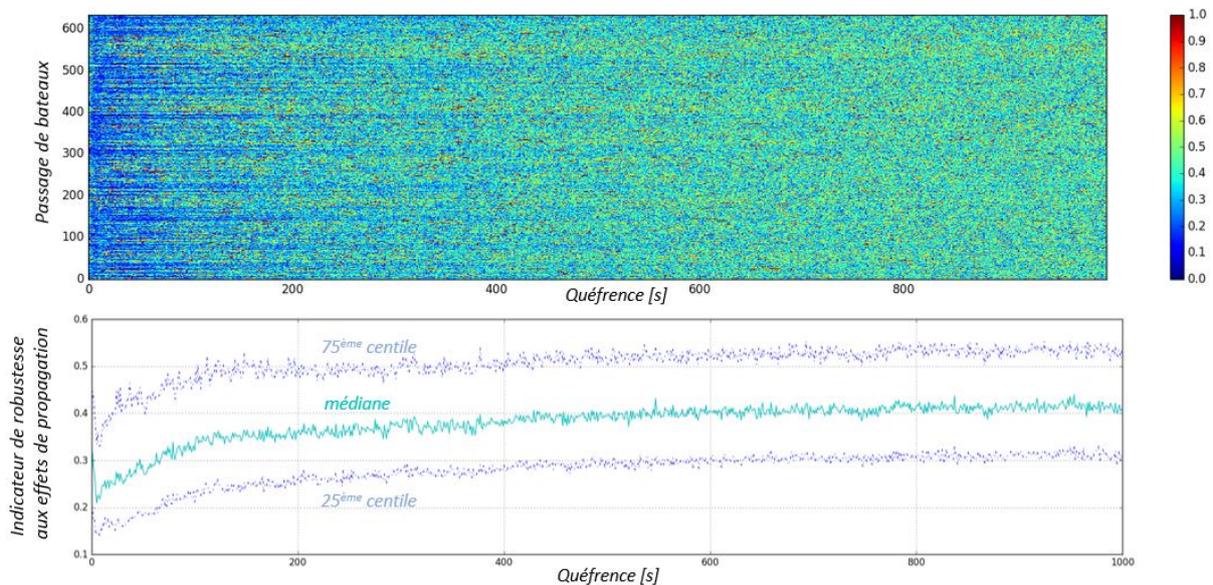


Figure 73 : Ratio entre les variations observées à une quéfrence donnée pour un même passage de bateaux et celles observées pour l'ensemble de la flottille (en haut), et les valeurs médianes, du 25^{ème} et 75^{ème} centile de cet indicateur (en bas)

Le cepstre du bruit rayonné par les bateaux est caractérisé par une forme de type sinusoïde amortie présentée sur la Figure 74. Les premiers 3/4 d'oscillations, correspondent principalement à la pente descendante, et sont très fortement marqués jusqu'à une quéfrence comprise entre 13 et 40 secondes (carrées bleus). Les oscillations se propagent ensuite selon l'axe des quéfrences avec une amplitude plus faible et un amortissement moindre (carrée violet).

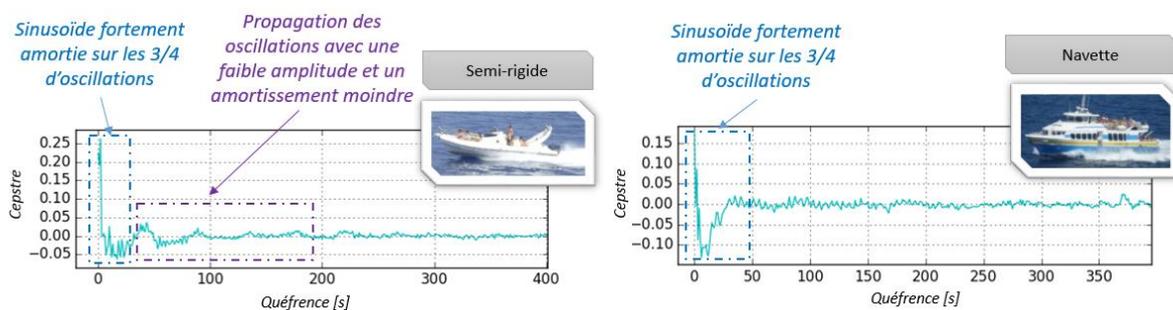


Figure 74 : Caractérisation du cepstre du bruit rayonné par les bateaux

La Figure 75 présente les fonctions de densité de probabilité du cepstre normé estimées pour chaque quéfrence. Les bateaux sont alors séparés en catégorie. Le cepstre médian (en rouge) et le cepstre médian +/- l'écart type (en bleu) sont représentés sur le graphique. Même si une forte ressemblance est à noter pour les bateaux de la catégorie navette de tourisme, la **visualisation de l'amortissement de l'oscillation principale permet difficilement d'extraire des caractéristiques discriminantes en**

fonction des paramètres physiques du bateau. D'un point de vue général, le retour à zéro de la 1^{ère} oscillation apparaît pour une quéfrence plus faible pour les petites embarcations.

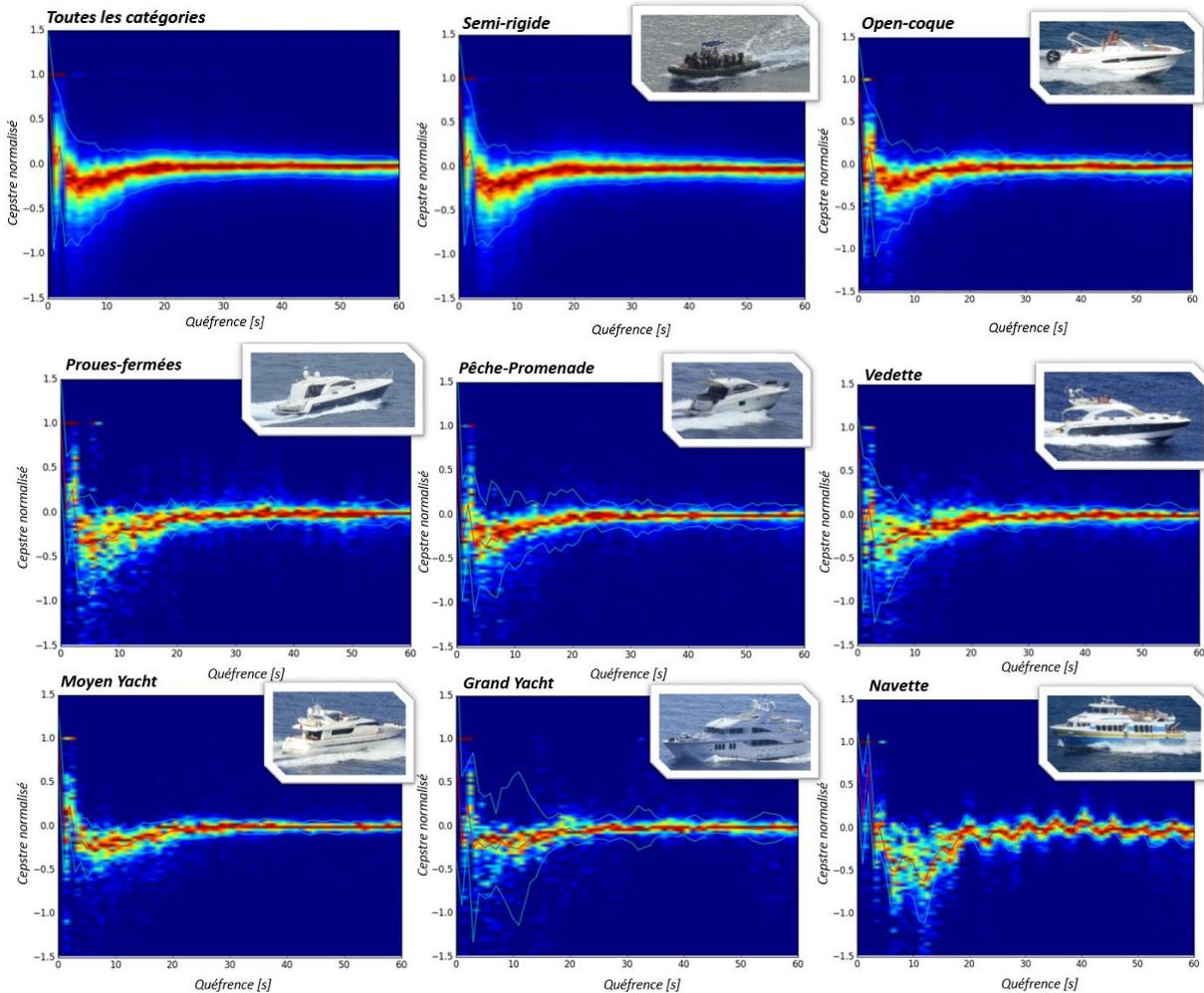


Figure 75 : Fonctions de densité de probabilité du cepstre en fonction de la quéfrence par catégorie de bateaux

Pour un sous-ensemble de la base de données, une rupture spectrale est présente au sein du cepstre : à la forme oscillante s'ajoute la présence d'une courte oscillation d'énergie plus importante. Ces courtes oscillations, composées de $1/2$ à $5/2$ périodes, apparaissent pour une quéfrence donnée, voir se répètent pour des multiples entiers de cette quéfrence. La quéfrence d'apparition de cette oscillation diminue en fonction de la taille du bateau. Dans le cas des grandes embarcations de vitesse supérieure à 4 m/s, cette valeur est comprise entre 300 et 500 pour les grands yachts, 330 et 370 pour les navettes, 260 et 480 pour les yachts médians. Pour les petites embarcations, ces oscillations sont présentes entre la quéfrence 90 et 300. Cette caractéristique est constatée sur une grande majorité de proues fermées et de pêche-plaisances, mais devient minoritaire dans le cas des open-coques (34 / 90). L'absence de cette propriété n'est pas liée à une notion de vitesse ou de type de moteur. Dans le cas des semi-rigides, cette propriété disparaît : seul 47 embarcations sur 345 présentent une faible oscillation. Cette courte oscillation présente des harmoniques.

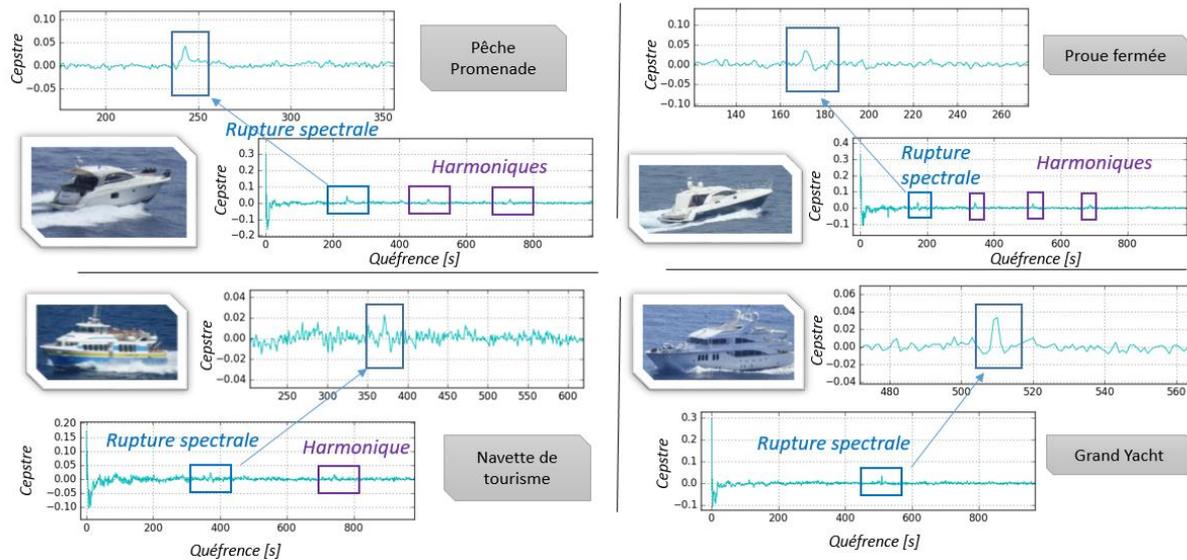


Figure 76 : Illustration de la rupture spectrale au sein du cepstre

6.4.4 Analyse des coefficients MFCC

Cette section porte sur l'analyse de l'évolution des coefficients MFCC en fonction de l'indice du filtre de Mel. Cette méthode de mesure présente une stabilité dans le temps : même si de faibles variations sont observées pour quelques petites embarcations, pour la plupart des extraits de bateaux, les 10 séquences possèdent des évolutions similaires. Ainsi, la valeur médiane du ratio des variations observées au sein d'un même bateau par rapport à l'ensemble de la flottille est inférieure à 0.3 (Figure 77).

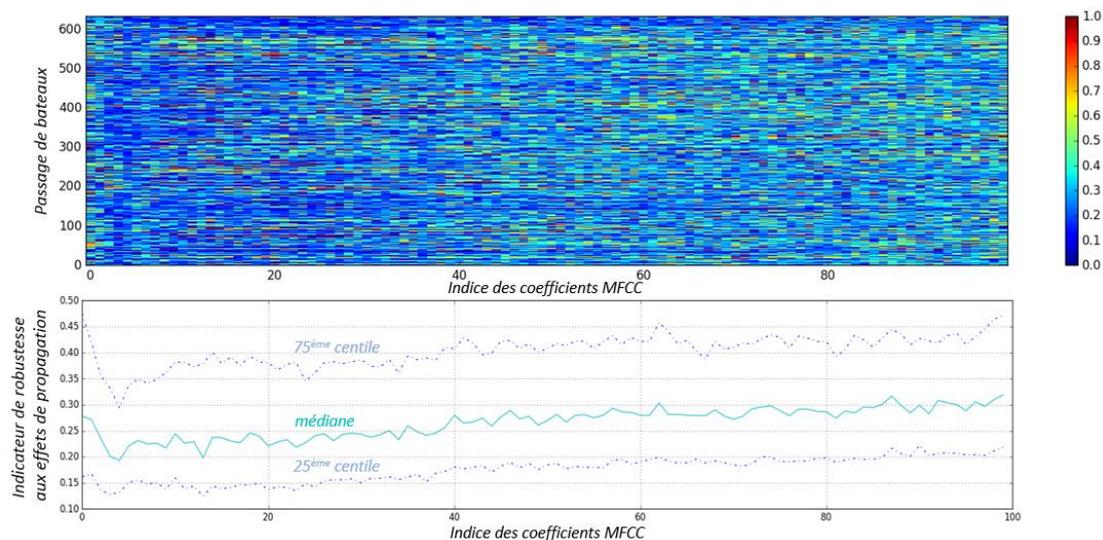


Figure 77 : Ratio des variations observées pour un coefficient MFCC donné durant le un même passage de bateaux et de celles observées pour l'ensemble de la flottille (en haut), et les valeurs médianes, du 25^{ème} et 75^{ème} centile pour l'ensemble de la flottille (en bas)

D'un point de vue général, l'évolution des coefficients MFCC en fonction de l'indice se traduit aussi par une forme de type sinusoïde amortie : les plus fortes variations sont présentes pour les premiers filtres de Mel et s'amoindrissent lorsque l'indice augmente. Ces fortes oscillations représentent entre de 3/4 et 11/4 de période d'une sinusoïde et sont majoritairement amorties à partir de l'indice de filtre 20. Au-dessus de cet indice, des oscillations, dont l'amplitude semble être modulée par une sinusoïde,

sont observées, ainsi que la présence de pic dans certain cas. Ces oscillations et cette modulation sont plus ou moins marquées en fonction des observations.

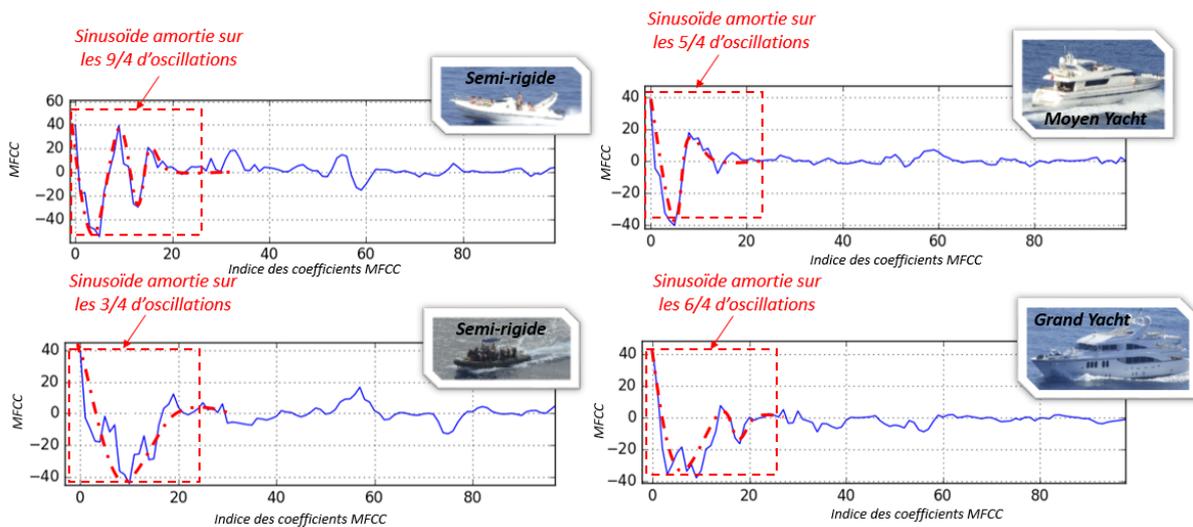


Figure 78 : Caractérisation de l'amortissement des coefficients MFCC du bruit rayonné par les bateaux

La simple visualisation des coefficients MFCC permet **difficilement d'extraire des caractéristiques discriminantes**. Quelques éléments différenciant intéressants apparaissent toutefois. Comme dans le cas de l'analyse spectrale, une forte ressemblance est présente au sein des individus de la catégorie navette en termes d'amortissement de la sinusoïde et de présence de minimum au-delà de l'indice de filtre 20 (pour l'indice de filtre 34). Pour les grands et médians yachts avec une vitesse de déplacement supérieure à 6 m/s, un fort amortissement est observé laissant présent 3/4 d'oscillations marquées suivies, dans certain cas, d'une faible demi-période. La contribution de cette demi-période devient fort conséquente pour des vitesses inférieures à 6 m/s. Ce fort amortissement diffère des navettes et n'est pas spécifique à cette catégorie : il est observé chez les petites embarcations indépendamment de leurs vitesses. Inversement, dans la catégorie semi-rigide, ce fort amoindrissement n'est observé que chez un sous-ensemble d'embarcations de vitesse inférieure à 3.5 m/s. Parmi les bateaux de type pêche-plaisance et open-coque, seul un sous-ensemble d'embarcations possédant un moteur hors-bord présente des oscillations plus nombreuses et/ou marquées avant amortissement. Cette caractéristique est fortement présente chez les semi-rigides, mais pas automatique.

La Figure 79 présente les fonctions de densité de probabilité des coefficients MFCC normées, ainsi que la valeur médiane (en rouge) et la médian +/- l'écart type (en noir). Les bateaux sont alors séparés en catégorie. En raison de la variété sur le nombre d'oscillations intra-catégorie, les oscillations sont peu visibles. Les fonctions de densité de probabilité semblent présentées seulement $\frac{1}{4}$ d'oscillation encadré par une enveloppe large et dont le minimum global est obtenu plus rapidement pour les petites embarcations.

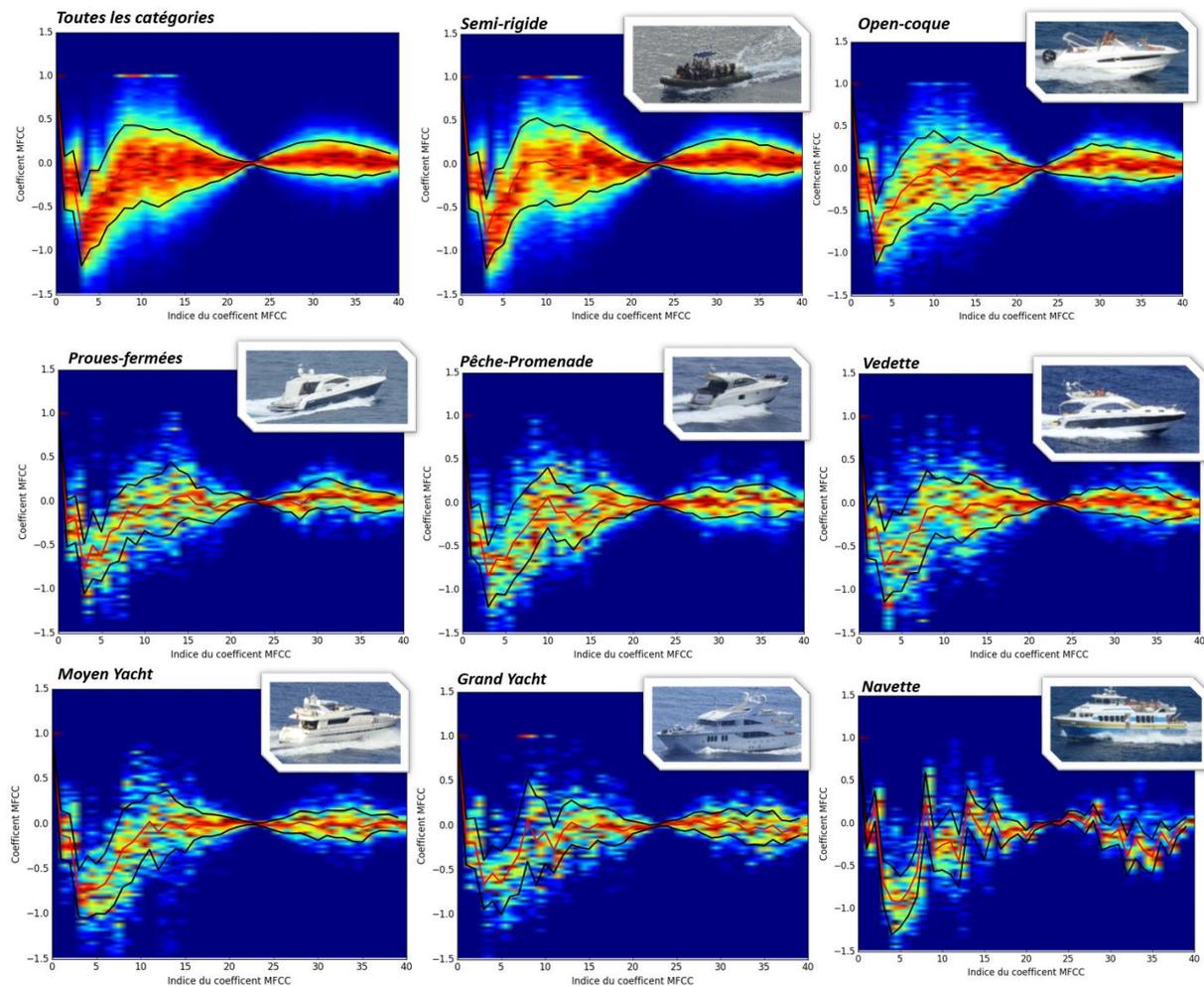


Figure 79 : Fonctions de densité de probabilité des coefficients MFCC par catégorie de bateaux

6.5 Discussion

6.5.1 Premiers éléments pour la création de l'arborescence de classification

L'analyse présentée ci-dessus montre que le critère le plus pertinent pour établir une classification est la taille du bateau : la comparaison dans les différents domaines montre un regroupement de caractéristiques entre d'un côté les navettes, les grands et médians yachts et, de l'autre côté, les pêche-plaisances, proues fermées, open-coques et zodiacs. Au sein des grandes embarcations, des différenciations apparaissent entre la taille de grandes embarcations et leur vitesse. Pour les petites embarcations, des différences sont apparues pour les bateaux équipés de moteur hors-bord et pour les semi-rigides.

6.5.2 Apport des différents espaces de représentation

Les quatre espaces de représentation apportent des éléments distinctifs en fonction de la taille du navire. En revanche, seule l'analyse cepstrale semble apporter des éléments discriminants au sein des petites embarcations. La rupture spectrale présente dans le cepstre est peu observée chez les semi-rigides. Les embarcations équipées d'un moteur hors-bord présentent des oscillations des coefficients MFCC plus nombreuses et/ou marquées avant amortissement. En revanche, l'origine de ces deux caractéristiques n'est pas identifiée.

6.5.3 Limitation de la méthode DEMON

L'analyse DEMON se base sur l'extraction de modulation au sein du bruit large bande et par conséquent, est limitée en termes de portée d'identification, particulièrement pour les petites embarcations rapides ayant un bruit large bande modéré. Pour un objectif de détection et d'identification de source au plus vite et avant leur passage au CPA, cette caractéristique est à prendre en considération.

Une différence avec les fondements théoriques est observée lors de l'analyse DEMON : le *shaft rate* n'est pas forcément marqué et la raie d'énergie maximale ne correspond pas forcément au *blade rate*. L'apparition d'une fréquence caractérisant le *shaft rate* est liée à la présence d'une pale qui cavite davantage que les autres pales. Pour de petites embarcations, la contribution individuelle des pales semble faible. Dans la majorité des cas, seule la cavitation de l'ensemble de l'hélice est observable. Pour les grandes embarcations, un défaut particulièrement prononcé sur une pale (liée à un choc par exemple) peut entraîner le comportement inverse : la signature d'une pale devient alors prépondérante par rapport à la signature de l'ensemble de l'hélice. L'identification des caractéristiques de la propulsion reste aisément réalisable par un analyste averti et possède en complément une visualisation du spectrogramme ou une écoute audio lui donnant un *a priori* sur le type de bateau recherché. Cependant, un algorithme simple cherchant automatiquement une relation entre les raies les plus énergétiques n'est pas suffisant pour correctement identifier les caractéristiques du bateau. L'utilisation d'algorithmes plus complexes, basés par exemple sur un apprentissage supervisé par un opérateur, aurait pu être envisagée.

6.6 Conclusion

L'état de l'art sur la détection et classification des bruits rayonnés par les embarcations montre que la majeure partie des études se focalise sur une analyse spectrale. D'autres méthodes d'analyse, marginales, commencent à apparaître : analyse cepstrale, analyse par ondelette, décomposition modale, étude des dimensions fractales, modélisation chaotique, etc. Certaines de ces méthodes sont déjà couramment utilisées lors de la classification d'autres sources sonores de types véhicules motorisés ou genres musicaux. L'état de l'art concernant les bruits rayonnés des bateaux met en évidence que la majorité des études exploite les caractéristiques extraites d'une unique méthode d'analyse.

Dans cette thèse, quatre méthodes d'analyse ont été choisies : l'analyse spectrale, DEMON, cepstrale et MFCC. L'analyse spectrale permet de caractériser le bruit large bande (principalement due à la cavitation) et le bruit bande étroite (dû aux systèmes en rotation). L'analyse DEMON permet d'extraire les modulations dues à la rotation des hélices présentes dans le bruit large bande. L'analyse cepstrale facilite la dissociation entre un signal en entrée et un filtre, et les coefficients MFCC permettent de traduire ce que notre système d'audition perçoit.

D'une manière générale, les résultats obtenus, à travers chaque méthode d'analyse, possèdent une grande diversité, particulièrement chez les petites embarcations.

D'un point de vue spectral, les PSD sont caractérisées par une bosse de bruit (plus large, de pente plus raide et de maximum plus haute en fréquence pour les petites embarcations) auquel s'ajoute un peigne de raies plus ou moins organisées (raies présentes sur la bosse montant et d'espacement plus faible pour les grandes embarcations). Une unité apparaît au sein des grandes embarcations et une forte diversité est notée pour les petites embarcations, liée à la présence de raies. Des peignes d'harmoniques fortement marqués entre 2 et 10 Hz sont présents indépendamment de la catégorie du bateau ou de sa vitesse. La présence d'auxiliaire permet la caractérisation individuelle des navettes de tourisme. Ainsi, l'essentiel de l'information large bande discriminante s'affiche en dessous de 1 kHz et jusqu'à 5 kHz pour les raies.

L'analyse DEMON présente plus de diversité intra-catégories qui se traduit par la présence de spectres de raies (isolées, non organisées ou harmoniques) et des spectres fortement « bruités » (absence de raie ou variance élevée). Les grandes embarcations possèdent des caractéristiques communes les différenciant des petites embarcations : la PSD est composée de 4 à 12 harmoniques dont l'espacement et la fréquence maximale semblent liés à la taille du bateau. Le potentiel de l'analyse DEMON, en termes d'identification des caractéristiques de propulsion, est difficilement automatisable par un algorithme simple cherchant des relations entre les raies les plus énergétiques pour les bateaux présents dans la base de données *BDD Séquence bateau*.

Les cepstres et des MFCC sont caractérisés par une forme de type sinusoïde amortie. Pour les cepstres les premiers 3/4 d'oscillations sont fortement marqués jusqu'à une fréquence inférieure à 40. Cet amortissement caractérise difficilement une catégorie de bateaux. Un élément discriminant apparaît toutefois : une rupture spectrale présente au sein du cepstre dont la fréquence d'apparition diminue en fonction de la taille du bateau. Cette propriété est peu présente chez les semi-rigides. Pour les MFCC, l'amortissement est réalisé à partir de l'indice 20. Pour les grandes embarcations, cet amortissement diffère entre les navettes et les grands / médians yachts et semble lié à la vitesse. Les embarcations équipées d'un moteur hors-bord présentent des oscillations plus nombreuses et/ou marquées avant amortissement.

7 Chapitre 7 : Descripteurs pour la classification d'une flottille côtière

Sommaire

7	Chapitre 7 : Descripteurs pour la classification d'une flottille côtière	147
7.1	Introduction.....	148
7.2	La réduction de dimension: l'état de l'art	149
7.2.1	Rappel sur la base de données et la durée d'analyse	149
7.2.2	Présentation des paramètres descripteurs	150
7.2.3	Protocole pour la création de l'arborescence de classification	161
7.3	Aptitude des descripteurs acoustiques à différencier des classes correspondant à chaque paramètres descriptifs des bateaux	162
7.3.1	Redondance des descripteurs acoustiques	162
7.3.2	Robustesse des descripteurs acoustiques par rapport aux effets de propagation.....	163
7.3.3	Relation entre les descripteurs acoustiques et les paramètres descriptifs du bateau	164
7.3.4	Détermination de l'arborescence de classification	171
7.4	Discussion	180
7.4.1	Un arbre de classification présentant de fortes inhomogénéités en termes de nombre d'individus par classe et indépendante de la catégorie du bateau.....	180
7.4.2	Redondance et robustesse des descripteurs lors de la création de l'arborescence de classification	180
7.4.3	De potentiels indicateurs acoustiques pour le suivi environnemental.....	181
7.5	Conclusion	182

7.1 Introduction

Quatre espaces de représentation ont été choisis pour l'étude des bruits rayonnés par la flottille côtière. Les résultats montrent une forte diversité, particulièrement pour les petites embarcations, difficilement interprétable en fonction des caractéristiques physiques et contextuelles de chaque passage de bateau. Toutefois, quelques éléments discriminants ont été observés. Les conclusions du chapitre précédent amènent à divers questionnements :

- *Existe-t-il des similarités entre les catégories de bateau non perceptibles lors de la visualisation de différentes méthodes d'analyse ? Et quels descripteurs acoustiques permettraient d'identifier ces similarités ?*
- *Quels descripteurs acoustiques permettraient de décrire les éléments différenciant entre les catégories de bateaux observés dans le chapitre 6 ?*

Des premiers éléments de réponse sont apportés par la revue bibliographique présentée dans le chapitre précédent. [Lourens_1987] réalise une classification des bateaux basée sur l'analyse des pôles de la modélisation AR de la densité spectrale de puissance du signal. [Sorensen_2010] observe la distribution d'harmoniques.

Ainsi, les objectifs de ce chapitre sont :

- Etablir une liste de descripteurs acoustiques caractérisant les bruits rayonnés des bateaux indépendamment des effets de propagation
- Evaluer leurs pertinences au regard des caractéristiques physiques et contextuels des bateaux composant la flottille
- Proposer une arborescence de classification acoustique des bateaux constituant cette flottille d'embarcations côtières.

Ce chapitre se divise en quatre sections. L'utilisation de plusieurs méthodes d'analyse nécessite d'étudier un nombre de paramètres conséquent. La première section de ce chapitre dresse un état de l'art sur les méthodes de réduction des dimensions dans un objectif de visualisation de l'ensemble des données.

La deuxième section présente la base de données, les descripteurs acoustiques et le protocole de classification retenu. Ces descripteurs acoustiques sont issus de l'état de l'art présenté dans le chapitre précédent ou spécifiquement développés pour identifier les éléments discriminants entre les catégories de bateaux. Des outils spécifiques ont été mis en place pour la détection de fréquence fondamentale et l'identification de la distribution d'harmoniques d'une part et à la détection de rupture spectrale d'autre part. Un protocole spécifique de classification des embarcations basé sur l'étude de ces descripteurs acoustiques est proposé.

La pertinence de ces descripteurs acoustiques sera alors jugée dans la troisième section. Un premier regard sera porté sur l'indépendance de descripteurs et la robustesse vis-à-vis des phénomènes de propagation. Le lien entre les descripteurs acoustiques et les paramètres physiques et contextuels des bateaux sera étudié. La distribution de cet ensemble de descripteur est observée dans un espace de dimension réduit en utilisant la méthode d'Analyse en Composante Principale (ACP). Une sélection des paramètres acoustiques les plus pertinents individuellement est proposée. Une arborescence de classification acoustique des petites unités de la flottille côtière est ensuite définie. Cette arborescence est réalisée de manière incrémentale par comparaison des paramètres du bateau et visualisation par ACP des sous-ensembles de données.

7.2 La réduction des dimensions : l'état de l'art

L'objectif de ce chapitre est d'établir une liste de paramètres des descripteurs acoustiques permettant la classification d'embarcations côtières. D'un point de vue individuel, le caractère discriminant de chaque descripteur est estimable par l'étude de la répartition des distributions en fonction de chaque classe. En revanche, des descripteurs « inefficaces isolément » peuvent devenir discriminant lors de la combinaison avec d'autres descripteurs. Lors d'une étude en dimension réduite, différents outils de visualisation permettent d'analyser les comportements conjoints des descripteurs (histogramme, affichage *scatter-plot* en 2 et 3 dimensions). Cette tâche se complique lorsque la dimension de l'étude augmente. Ainsi, lors de l'analyse d'espaces de grandes dimensions, la réduction de données s'impose. Cette technique est utilisée pour différentes applications : le prétraitement des données (filtrage, élimination de points aberrants), la suppression de données redondantes, la compression de données, la visualisation d'espace de grande dimension et la classification.

De nombreuses méthodes linéaires et non linéaires permettent d'effectuer la réduction de dimension. Les méthodes non linéaires de réduction de données reposent sur 3 techniques différentes : la conservation des propriétés globales de l'ensemble des données, la conservation des propriétés locales de l'ensemble des données et l'alignement global de modèles linéaires. La méthode de conservation globale de propriété est la plus répandue. Parmi, les méthodes globales non linéaires les plus courantes figurent le *multidimensional scaling* (MSD) [Cox_1994], l'Isomap [Tenenbaum_1998] et la *kernel* ACP [Schölkopf_1998]. Parmi les méthodes linéaires, les méthodes les plus couramment utilisées sont l'Analyse par Composante Principale ACP [Hotelling_1933], l'Analyse en Composant Factorielle ACF [Benzécri_1973], l'Analyse en Composantes Indépendantes ICA [Comon_1990], l'Analyse Discriminantes Linéaire LDA [Celeux_1994]. Les méthodes de type ACP, ACF et ICA reposent sur une transformation linéaire conduisant à une base de dimension réduite dans lequel la variance des données est maximale. La méthode LDA effectue une séparation de classe en minimisant les variations entre individus et en maximisant les variations entre différents individus.

Les méthodes non linéaires surpassent les méthodes linéaires lors d'étude de données artificielles hautement non linéaires. Les résultats appliqués à des données réelles sont cependant différents : [Maaten_2008] a montré que les méthodes non linéaires ne permettent pas d'obtenir de meilleurs résultats sur des données réelles. De plus, les méthodes non linéaires possèdent généralement un coût de calcul plus élevé. Ainsi, mon choix s'est porté sur une méthode linéaire de réduction de dimension, et plus particulièrement sur l'ACP.

L'ACP repose sur l'hypothèse que les directions de fortes variances contiennent plus d'informations que les directions de faibles variances. L'ACP vise à transformer des variables initialement corrélées en variables décorréélées. Cette transformation est alors réalisée en effectuant une combinaison linéaire des variables initiales tout en cherchant à minimiser l'erreur quadratique moyenne de reconstructions. Ces nouvelles variables sont alors nommées « *composantes principales* ». La sélection des composantes principales portant le plus de variances permet de réduire la dimension d'étude. Présentation de la base de données, des descripteurs acoustiques et du protocole de classification

7.2.1 Rappel sur la base de données et la durée d'analyse

La base de données utilisée pour ce chapitre est composée de 598 signatures acoustiques de bateaux. Chaque bateau est défini par une série de paramètres :

- Paramètres physiques :
 - Le type de motorisation : in-bord ou hors bords (paramètre qualitatif à 2 possibilités)
 - Le type de propulsion principale : jet, hélice ou à vent (paramètre qualitatif à 3 choix)

- La catégorie de bateau : semi-rigide, open-coque, proue fermée, pêche promenade, vedette, moyen et grand yacht, navette de tourisme (paramètre qualitatif à 8 possibilités)
- La longueur du bateau
- Paramètres contextuels :
 - La vitesse au CPA
 - L'accélération : vitesse constante, accélération ou décélération (p. qualitatif à 3 possibilités)
 - La distance au CPA
 - L'angle formé au CPA avec l'enregistreur acoustique
 - La trajectoire prise par le bateau : de la Revellata vers la Citadelle, de la Citadelle vers la Revellata, de la Revellata vers l'Anse de l'Oscelluccia, de l'Anse de l'Oscelluccia vers la Revellata, de la Revellata vers l'Alga, de l'Alga vers la Revellata, de la Revellata vers l'île rousse et de l'île rousse vers la Revellata. (paramètre qualitatif à 8 possibilités)

Chaque passage de bateau est étudié sur une durée de 60 secondes centrée autour du CPA, puis décomposée en 10 sessions de 10 secondes considérées comme des individus indépendants pour la suite du chapitre.

7.2.2 Présentation des paramètres descripteurs

Cette section présente les différents descripteurs acoustiques considérés pour cette étude. Le chapitre 6 a mis en lumière des éléments différenciant entre les catégories de bateaux. Des descripteurs acoustiques et des méthodes spécifiques visant à exploiter ces éléments discriminants sont présentés dans un premier temps.

Des éléments différenciant observés lors de **l'analyse spectrale** sont liées à la d'une bosse de cavitation. Sa caractérisation est réalisée sur l'enveloppe de la PSD estimée jusqu'à 2 kHz. L'indentification de la fin de cette dernière est réalisée par régression linéaire entre le logarithme de la fréquence et le logarithme de l'enveloppe. Les descripteurs acoustiques extraits sont présentés dans Figure 80.

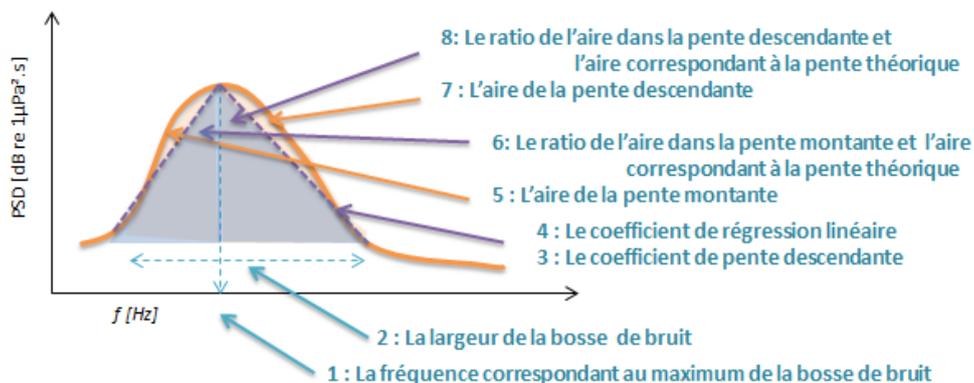


Figure 80 : Descripteurs caractérisant la bosse de bruit spectral

L'analyse spectrale et l'analyse du spectre DEMON montre la présence de raies discriminantes entre les catégories de bateaux. Un ensemble de descripteurs acoustiques caractérisant le positionnement de ces raies est présenté dans Table 28 et est appliqué au spectre DEMON, ainsi que sur trois bandes de fréquence du spectre : 0-300 Hz, 300 Hz - 2 kHz et 2 kHz – 10 kHz.

1	Le nombre de raies	7	La fréquence minimale associée à une raie
2	La fréquence de la raie le plus énergétique	8	La différence de fréquence la plus probable
3	Le ratio de fréquence entre la raie la plus énergétique et la première raie	9	La probabilité associée à la différence de fréquence la plus probable
4	Le ratio d'énergie entre les deux raies les plus énergétiques	10	La probabilité que la partie décimale du ratio des fréquences soit inférieur à 0.1
5	La différence moyenne entre les raies	11	La fréquence minimale concernée par 10
6	La fréquence maximale associée à une raie	12	le ratio d'énergie entre les raies et l'ensemble de la bande (excepté pour l'analyse DEMON)

Table 28 : Descripteurs caractérisant la présence de raie sur le spectre et le spectre DEMON

L'identification d'une structure de type harmonique est réalisée par un algorithme spécifiquement mise au cours de cette thèse. Cet algorithme s'inspirant de la méthode proposée par [Sorensen_2010] et [Ogden_2011] basée sur la corrélation de Pearson entre un peigne d'harmoniques et la PSD. Une adaptation est proposée afin de permettre le bon fonctionnement de l'algorithme en présence d'un harmonique fortement marqué. Ainsi, l'algorithme développé au cours de cette thèse consiste à estimer la corrélation de Pearson entre le peigne d'harmoniques et un peigne de raies non pondéré issu de la PSD. La Figure 81 présente le schéma complet de l'algorithme d'estimation de la distribution d'harmonique qui est détaillé en Annexe 3 (p 238).

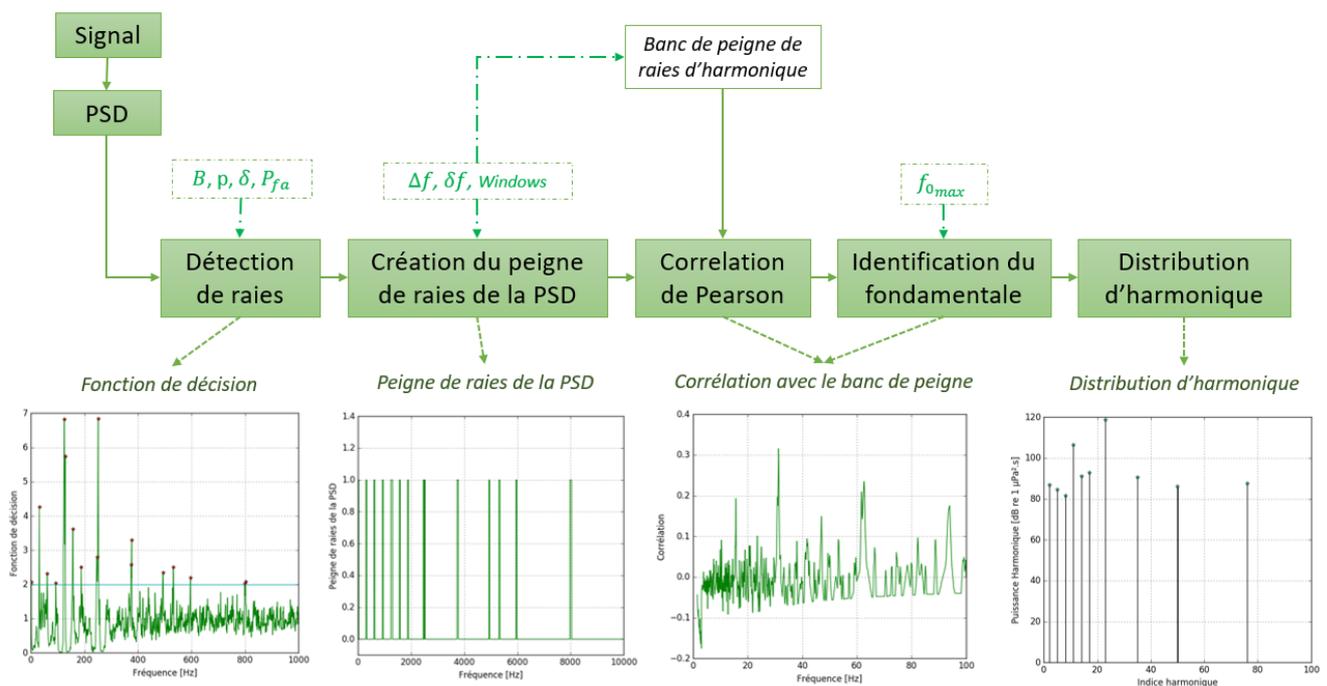


Figure 81 : Schéma de la méthode de d'estimation de la distribution d'harmoniques

Les paramètres descripteurs liés à la présence d'harmoniques sont présentés dans la Table 29. En vue des observations réalisées sur l'analyse DEMON dans le chapitre 6, cette détection n'est réalisée qu'uniquement sur le **spectre du signal**.

Paramètres lors de la recherche de la fréquence fondamentale f_0			
1	Corrélation avec le peigne lors de f_0	4	Ratio de corrélation entre f_0 et le maximum
2	Ratio de fréquence entre le maximum de corrélation et la corrélation en f_0	5	Largeur du pic de corrélation obtenu pour le maximum
3	Ratio de fréquence entre le 2 ^{ème} maximum de corrélation et la corrélation en f_0	6	Largeur du pic de corrélation obtenu pour en f_0
Paramètres sur la répartition des harmoniques			
7	Ratio d'énergie entre l'harmonique le plus énergétique et l'ensemble de la distribution	13	Ratio d'énergie des harmoniques entre 0 – 300 Hz par rapport à la bande 0 – 10 kHz
8	Ratio d'énergie en f_0 par rapport à l'ensemble de la distribution	14	Ratio d'énergie des harmoniques entre 300 Hz – 2 kHz par rapport à la bande 0 – 10 kHz
9	Indice de l'harmonique maximal	15	Ratio d'énergie des harmoniques entre 2 – 10 Hz par rapport à la bande 0 – 10 kHz
10	Différence moyenne entre les fréquences réelles et les fréquences théoriques	16	Nombre d'harmoniques représentant 90% de l'énergie totale des harmoniques
11	Pourcentage d'harmonique parmi les raies	17	Nombre d'harmoniques représentant 75% de l'énergie totale des harmoniques
12	Probabilité de présence des harmoniques par rapport à une distribution parfaite	18	Nombre d'harmoniques représentant 50% de l'énergie totale des harmoniques

Table 29 : Descripteurs liés à la présence d'harmoniques

A cette liste de descripteurs acoustiques liées à la présence d'harmonique s'ajout d'autres descripteurs choisis parmi ceux présents dans la littérature de classification de genres musicaux. La Table 30 réfère ces différents descripteurs où le coefficient $a(h)$ correspond à l'amplitude de chaque harmonique.

La fréquence fondamentale f_0 des harmoniques	Le nombre d'harmonique H
L' indice de l'harmonique le plus énergétique	Le noisiness , correspondant au ratio entre l'énergie hors harmonique et l'énergie totale : $\text{Noisiness} = \frac{\text{Energie}_{\text{noise}}}{\text{Energie}_{\text{total}}}$
Le Odd to Even Harmonic Energy ratio , correspondant au ratio d'énergie des harmoniques impaire et paire : $\text{OER} = \frac{\sum_{h=1:2:H} a^2(h)}{\sum_{h=2:2:H} a^2(h)}$	La déviati on spectrale harmonique , correspondant à la différence entre l'enveloppe des harmoniques SE(h) et leurs amplitudes : $\text{HDVE} = \frac{1}{H} \sum_h (a(h) - SE(h))$
Le coefficient d'inharmonicité . L'inharmonicité correspondant à la déviation entre la fréquence théorique d'un harmonique et sa réelle (Figure 82). En traitement musical, ce phénomène est particulièrement observé pour les sons de piano dus à la raideur des fils d'aciers composant les cordes du piano et s'accroît lorsque la longueur des cordes est faible. Cette déviation s'accroît avec la fréquence et peut être modélisée par une fonction mathématique. Dans le cas présent, il est noté qu'il y a un biais dans l'estimation de ce coefficient induit par la méthode de recherche d'harmonique. $\text{Inharmo} = \frac{2 \sum_h f(h) - h \cdot f_0 \cdot a^2(h)}{f_0 \sum_h a^2(h)}$	

Table 30 : Descripteurs associés aux harmoniques issus de la classification de genre musicaux

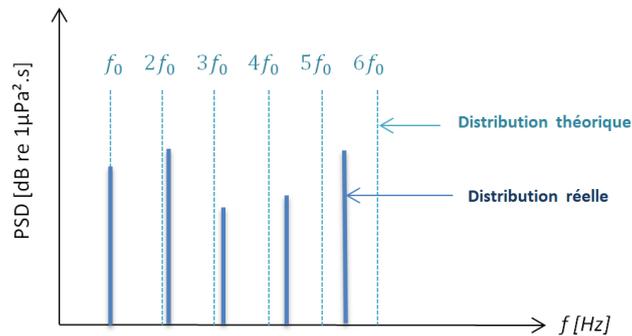


Figure 82 : Illustration du phénomène d'inharmonicité

Le **cepstre et les coefficients MFCC** des bruits rayonnés par les bateaux ont une forme de sinusoïde amortie en début de signal. Ces deux fonctions sont caractérisées par des descripteurs permettant d'évaluer cet amortissement. Ces huit descripteurs présentés dans la Figure 83 sont estimés sur le signal et son enveloppe. L'enveloppe correspond à la valeur absolue du signal analytique (voir annexe 3 p 235).

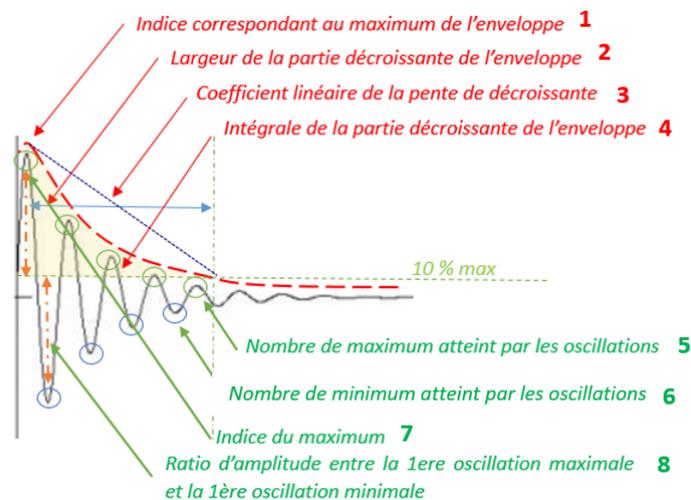


Figure 83 : Descripteurs caractérisant l'amortissement

Une rupture spectrale est observée sur le **cepstre du signal**. Un algorithme de détection de rupture spectrale a donc été mis en place au cours de cette thèse. Cet algorithme se base sur les travaux de [Basseville_1982] en intégrant l'adaptation proposée par [Andre-Obrecht_1988] et en proposant une modification concernant la fonction de décision. Le schéma de la méthode utilisée pour ces travaux est visible sur la Figure 84 et détaillé dans l'annexe 3 (p 240). La rupture spectrale présente est caractérisée par deux paramètres :

- L'indice de la quéfrence correspondant à la plus forte rupture présente dans le cepstre,
- La valeur de la fonction de décision pour cet indice.

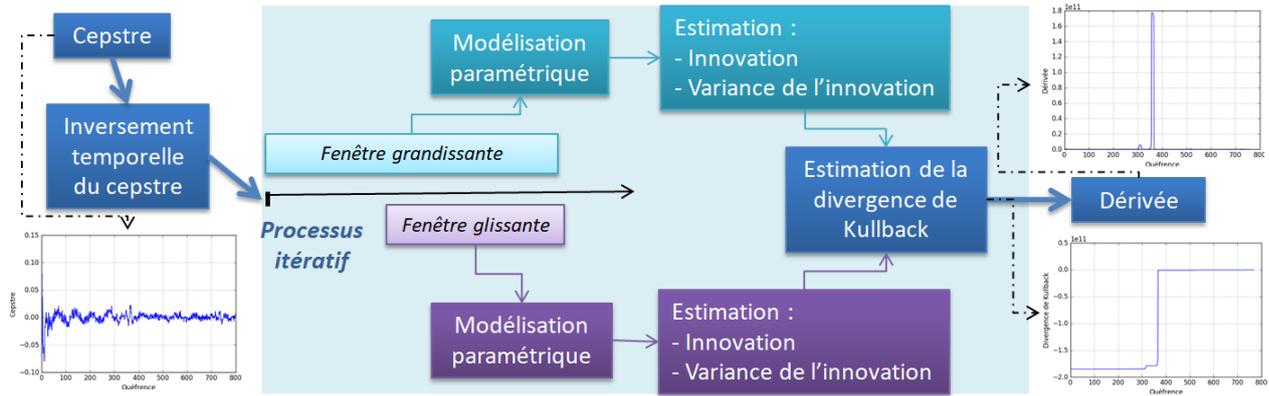


Figure 84 : Schéma de l'algorithme de détection de rupture spectrale

La définition de descripteurs acoustiques pour l'analyse des bruits rayonnés s'éteint alors à d'autres espaces de représentation non présentés dans le chapitre 6 :

- L'analyse temporelle ainsi que l'analyse de l'enveloppe du signal,
- L'analyse de la distribution d'harmonique ainsi que son enveloppe,
- L'analyse de l'enveloppe de la PSD,
- L'analyse de l'enveloppe des coefficients MFCC,
- L'analyse du spectrogramme,
- L'analyse par paquet d'ondelette.

Spécifique à l'analyse du domaine temporelle, le descripteur **Zero-crossing rate** mesure le nombre de passage à zéros réalisée par un signal.

La décomposition en ondelette offre l'avantage d'une décorrélation entre résolution temporelle et fréquentielle et permet ainsi une résolution temporelle élevée et une résolution basse fréquence pour les hautes fréquences, ainsi qu'une résolution temporelle et haute fréquence faible pour les basses fréquences. L'utilisation de paquets d'ondelettes caractérise les non stationnarités présentes au sein du bruit rayonné et ouvre l'étude vers une dimension multi-échelle. La méthode de création des paquets d'ondelettes est présentée en Annexe 3 p 236. Des méthodes de détection de bateau basées sur l'analyse par ondelette présente dans la littérature : [Averbuch_2011] étudie les paquets d'ondelettes jusqu'à une fréquence de 500 Hz et sélection des bandes différenciant pour réaliser sa classification. Pour cette thèse, les ondelettes sont utilisées pour permettre la représentation dans un espace multi-échelle et non pour sélectionner une bande d'intérêt. Ainsi l'estimation de l'énergie obtenus pour chaque niveau de décomposition permet la création d'une carte d'énergie dont la forme est étudiée et caractérisée par un nombre de descripteurs acoustiques. Cette analyse par ondelette est appliquée pour des fréquences inférieures à 2.4 kHz, en utilisant des ondelettes orthogonales de types *Daubechies* d'ordre 2 [Daubechies_1992] et pour un niveau maximal de décomposition de 10.

Les formes des distributions obtenues pour chaque espace de représentation sont analysées. La Table 31 présente les descripteurs de la forme d'une distribution choisi parmi ceux présent dans la littérature et définit pour l'exemple dans le domaine spectral avec σ la PSD et f la fréquence. En effet, ces descripteurs sont principalement appliqués dans la littérature pour caractériser la forme spectrale d'un signal. Leurs usages n'est pas exclusif à ce domaine. Ainsi [Peeters_2004] applique ces paramètres à l'enveloppe spectrale du signal et à la distribution en harmonique. De même, [Tucker_2005] utilise ces descripteurs correspondent pour caractériser une distribution temporelle, fréquentielles, de la

puissance temporelle, de la puissance fréquentielle et de la puissance. Ainsi, ces paramètres seront appliqués aux différents espaces de représentation.

Les moments (caractérisant la PSD)

L'**écart-type** ou la déviation standard σ (moment d'ordre 2) permet de mesurer la dispersion d'une variable.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_k (a_k - \mu)^2} \text{ - Équation 25 ou } \mu \text{ correspond à la moyenne}$$

Le **skewness** correspond au moment d'ordre 3 d'une variable aléatoire. Ce coefficient permet de mesurer l'asymétrie d'une distribution autour de sa valeur moyenne.

$$\text{Skewness} = \frac{\sum_k (a_k - \mu)^3}{K \cdot \sigma^3}$$

Le **Kurtosis** correspond au moment d'ordre 4 d'une variable aléatoire. Ce coefficient permet d'effectuer une mesure de l'aplatissement d'une distribution autour de sa valeur moyenne.

$$\text{Kurtosis} = \frac{\sum_k (a_k - \mu)^4}{K \cdot \sigma^4}$$

Les attributs dérivés des moments (caractérisant des fréquences)

Le **centroïde** correspond au barycentre ou centre de gravité de la distribution.

$$\text{Centroïde} = \frac{\sum_k f_k \cdot a_k}{\sum_k a_k}$$

Le **spread** ou *largeur* correspond à l'étendu autour du centroïde et au carré de la bande passante.

$$\text{Spread} = \frac{\sum_k (f_k - \text{Centroïde})^2 \cdot a_k}{\sum_k a_k}$$

La mesure de « platitude » et de crêtes (caractérisant la PSD)

Le **Flatness** (la platitude) correspond au ratio entre la moyenne géométrique et la moyenne arithmétique.

$$\text{Flatness} = \frac{\prod_k a_k^{1/K}}{\frac{1}{K} \sum_k a_k}$$

Le **Crest Factor** (facteur crête) correspond au rapport entre le maximum d'amplitude et la moyenne obtenue dans une bande *sb*.

$$\text{CrestFactor} = \frac{\max_{k \in sb} a_k}{\frac{1}{K} \sum_{k \in sb} a_k}$$

Les paramètres de pentes (caractérisant la PSD)

Le **slope** (la pente) est obtenu par régression linéaire de l'amplitude de la distribution.

$$\text{Slope} = \frac{K \sum_k f_k a_k - \sum_k f_k \sum_k a_k}{K \sum_k f_k^2 - (\sum_k a_k)^2}$$

Le **decrease** (la décroissance) permet de mesurer le taux de décroissance.

$$\text{Decrease} = \frac{1}{\sum_{k=2}^K a_k} \sum_{k=2}^K \frac{a_k - a_1}{k - 1}$$

Autres descripteurs (caractérisant des fréquences)

Le **Roll-off** correspond à la largeur de bande nécessaire pour caractériser X % de l'énergie de la distribution.

$$\sum_{f=0}^{f_{RL}} a_f^2 = X \cdot \sum_f a_f^2$$

Table 31 : Descripteur acoustique de la forme d'une distribution

L'espace de représentation qualifié de *spectrogramme* fait référence aux 23 descripteurs définis par [Tucker_2005]. Aux paramètres de forme précédemment cités s'ajoutent des descripteurs de la puissance maximale observée et de l'évolution temporelle de l'énergie. Ces descripteurs sont présentés dans la Table 32. Pour le cas présent, ces paramètres sont estimés dans la bande 0 à 9.75 kHz, avec une résolution temporelle de 0.5 s et une résolution fréquentielle de 2.38 Hz.

<p>Peak power : le maximum de la puissance totale sur toutes les trames temporelles</p> $Pp = \max(p_t)$ <p>avec $p_t = \sum_f p_{t,f}$</p>	<p>Average power : la moyenne des puissances totales sur toutes les trames temporelles</p> $Ap = \frac{\sum_T p_t}{T}$	<p>Time of peak power : l'indice de la trame temporelle correspondant au maximum</p> $T_{pp} = \arg \max_t (p_t)$
<p>Frequency of peak power : la fréquence correspondant au maximum</p> $F_{pp} = \arg \max_f (p_f)$ <p>avec $p_f = \sum_t p_{t,f}$</p>	<p>Mean frequency : la moyenne de la fréquence pondérée par la puissance</p> $\bar{f} = \frac{\sum_f f \cdot p_f}{P}$ <p>avec $P = \sum_f p_f$</p>	<p>RMS bandwidth : la largeur de bande fréquentielle</p> $B = \sqrt{\frac{\sum_f f^2 \cdot p_f}{P} - \bar{f}^2}$
<p>Frequency skewness : la moyenne du skewness fréquentielle</p> $Skew_f = \sqrt{\frac{\sum_f (f - \bar{f})^3 \cdot p_f}{B^3 P}}$	<p>Frequency kurtosis : la moyenne du kurtosis fréquentielle</p> $K_f = \sqrt{\frac{\sum_f (f - \bar{f})^4 \cdot p_f}{B^4 P}}$	<p>Mean time : la durée moyenne pondérée par la puissance</p> $\bar{t} = \frac{\sum_t t \cdot p_t}{PT}$
<p>RMS time : la largeur de bande temporelle</p> $C = \sqrt{\frac{\sum_t t^2 \cdot p_t}{P} - \bar{t}^2}$	<p>Temporal skewness : la moyenne du skewness temporelle</p> $Skew_t = \sqrt{\frac{\sum_t (t - \bar{t})^3 \cdot p_t}{C^3 P}}$	<p>Temporal kurtosis : la moyenne du kurtosis temporelle</p> $K_t = \sqrt{\frac{\sum_t (t - \bar{t})^4 \cdot p_t}{C^4 P}}$
<p>Power standard deviation : la déviation standard de la puissance</p> $P_{sd} = \sqrt{\frac{FT \sum_{t,f} (p_{t,f})^2}{P^2} - 1}$	<p>Power standard deviation - time : la déviation standard de la puissance en temporelle</p> $P_{sd_t} = \frac{T \sum_t p_t^2}{P^2} - 1$	<p>Power standard deviation - frequency : la déviation standard de la puissance en fréquentielle</p> $P_{sd_f} = \frac{F \sum_f p_f^2}{P^2} - 1$
<p>Power skewness : le skewness de la puissance</p> $Skew_p = \frac{\frac{1}{FT} \sum_{t,f} (p_{t,f} - \bar{P})^3}{\bar{P}^3}$ <p>avec $\bar{P} = \frac{P}{FT}$</p>	<p>Power skewness - time : le skewness de la puissance en temporelle</p> $Skew_{p_T} = \frac{\frac{1}{T} \sum_t (p_t - \bar{P})^3}{\bar{P}^3}$	<p>Power skewness - frequency : le skewness de la puissance en fréquentielle</p> $Skew_{p_F} = \frac{\frac{1}{F} \sum_f (p_f - \bar{P})^3}{\bar{P}^3}$
<p>Power kurtosis : le kurtosis de la puissance</p> $K_p = \frac{\frac{1}{FT} \sum_{t,f} (p_{t,f} - \bar{P})^4}{\bar{P}^4}$	<p>Power kurtosis - time : le kurtosis de la puissance en temporelle</p> $K_{p_T} = \frac{\frac{1}{T} \sum_t (p_t - \bar{P})^4}{\bar{P}^4}$	<p>Power kurtosis - frequency : le kurtosis de la puissance en fréquentielle</p> $K_{p_F} = \frac{\frac{1}{F} \sum_f (p_f - \bar{P})^4}{\bar{P}^4}$
<p>Rate of attack : Le taux d'attaque correspondant à la plus forte pente montante observée avant le maximum en L</p> $RA = \max_{t=0, \dots, L} \left(\frac{P_t - P_{t-1}}{\max(P_t)} \right)$	<p>Rate of decay : Le taux de décroissance correspondant à la plus forte décroissance observée après le maximum en L</p> $RD = \min_{t=L, \dots, T} \left(\frac{P_t - P_{t+1}}{\max(P_t)} \right)$	

Table 32 : Descripteur acoustique du « spectrogramme » [Tucker_2005]

La caractérisation de la forme d'un signal est également réalisée par **modélisation paramétrique**. Cette modélisation paramétrique se base sur la connaissance à priori d'un signal. Ce processus permet d'établir un modèle mathématique d'un signal caractérisé sous la forme d'un filtre. Ce filtre est alors défini par ses pôles et ses zéros. Les deux principaux modèles linéaires sont le modèle *AutoRegressive* (auto régressive) **AR** et le modèle *Moving Average* (moyenne mobile) **MA**. Dans les deux modèles, le

signal est décomposé en deux termes : les observations et le bruit. Introduit par [Yule_1927], le processus auto régressif AR vise à définir l'observation à un instant t en fonction des observations passées. Mathématiquement, ce modèle est caractérisé par un filtre ayant ces zéros aux centres et paramétrable seulement par ces pôles. A l'inverse, le modèle à moyenne mobile MA présenté par [Slutzky_1927] permet de définir l'observation à l'instant t en fonction des variations passées du terme stochastique et est caractérisé par un filtre ayant ces pôles au centre (paramétrable seulement par ces zéros). D'autres modèles tels que le modèle *Autoregressive moving average* **ARMA**, *Autoregressive integrated moving average* **ARIMA**, *Auto-Regressive Moving Average with exogenous inputs* **ARMAX** réalisent une combinaison des modèles AR et MA et sont caractérisés par un filtre composé de zéros et de pôles.

D'un point de vue traitement du signal, le modèle AM est plus adapté pour la modélisation de signaux dont le spectre est plat, alors que le modèle AR permet une meilleure caractérisation du spectre de raie. Le modèle *AutoRegressive* (auto régressive) **AR** est utilisé par [Wales_2002] pour décrire les spectres des bateaux et par [Lourens_1987, Farrokhrooz_2005_a] pour classer les spectres de bateaux. Le choix du modèle se porte donc sur un modèle de type AR qui est défini par le filtre d'ordre p suivant :

$$H(z) = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^p \varphi_p(k).z^{-k}} \quad \text{- Équation 26}$$

Le choix de l'ordre optimal du modèle est réalisé en utilisant le critère BIC (*Bayesian information criterion*) [Schwarz_1978]. Ce critère se base sur la minimisation d'une fonction de coût dépendant de la vraisemblance du modèle estimé, du nombre d'observation et du nombre de paramètres du modèle. L'estimation des coefficients du modèle AR est alors obtenue par résolution des équations de Yule-Walker, reliant les coefficients φ_k du modèle AR à l'auto covariance γ du signal :

$$\gamma_j = \sum_{k=1}^p \varphi_k \gamma_{j-k} \quad \forall j = 1, \dots, p \quad \text{- Équation 27}$$

Dans le cadre de cette thèse, l'ordre d'estimation du modèle P est identique pour chaque bateau. La modélisation paramétrique permet alors de déterminer les coefficients du filtre mais aussi les pôles du filtre et l'innovation du signal. Un ensemble de descripteurs est défini pour caractériser les résultats de la modélisation paramétrique et présenté dans la Table 33. Ainsi, lors d'une modélisation d'ordre 2, le modèle est caractérisé par 11 valeurs : 3 coefficients, 2 pôles, la distance et de l'angle du 1^{er} pôle, le gain du filtre (1), l'ordre idéal (1) et 2 termes liés à l'innovation (différence de moyenne et de variance).

Descripteurs	Nombre de descripteurs	Descripteurs	Nombre de descripteurs
Les coefficients du filtre	P+1	Les pôles du filtre	P
La distance à l'origine des pôles	P-1	L'angle formé par les pôles	P-1
Le gain du filtre	1	L'ordre idéal selon le critère du BIC	1
La différence moyenne entre le signal et sa modélisation	1	La variance de la différence entre le signal et sa modélisation	1

Table 33 : Descripteurs acoustique associée à la modélisation paramétrique d'ordre P

Les tables ci-dessous (Table 34 à Table 40) résument l'ensemble des paramètres considérés pour cette étude. Les descripteurs acoustiques sont regroupés en plusieurs catégories en fonction de l'espace de représentation ciblé.

Descripteurs de la structure temporelle :

Indice	Nom du paramètre	Nb	Indice	Nom du paramètre	Nb
Sur le signal			Sur l'enveloppe du signal		
T0	Zero-crossing rate	1	T6	Centroïde enveloppe temporel	1
T1	Centroïde temporelle	1	T7	Roll-off enveloppe temporel	1
T2	Roll-off temporel	1	T8	Déviation standard enveloppe temporelle	1
T3	Déviation standard temporelle	1	T9	Kurtosis enveloppe temporelle	1
T4	Kurtosis temporelle	1	T10	Skewness enveloppe temporelle	1
T5	Skewness temporelle	1			

Table 34 : Liste des descripteurs temporels

Descripteurs de la structure spectrale :

Indice	Nom du paramètre	Nb	Indice	Nom du paramètre	Nb
<i>Etude dans la bande 0 Hz -10 kHz</i>					
PSD			Enveloppe de la PSD		
S0	Déviation standard spectrale	1	S11	Déviation standard env.	1
S1	Skewness spectrale	1	S12	Skewness enveloppe spectrale	1
S2	Kurtosis spectrale	1	S13	Kurtosis enveloppe spectrale	1
S3	Centroïde spectrale	1	S14	Centroïde enveloppe spectrale	1
S4	Spread spectrale	1	S15	Spread enveloppe spectrale	1
S5	Flatness spectrale	1	S16	Flatness enveloppe spectrale	1
S6	Crest Factor Spectrale	1	S17	Crest Factor env. Spectrale	1
S7	Slope Spectrale	1	S18	Slope enveloppe Spectrale	1
S8	Decrease Spectrale	1	S19	Decrease enveloppe Spectrale	1
S9-10	Roll off à 85 % et 50 %	2	S20-21	Roll off à 85 % et 50 %	2
<i>Etude dans la bande 0 Hz – 2 kHz</i>					
PSD			Enveloppe de la PSD		
S22	Déviation standard spectrale		S33	Déviation standard env.	1
S23	Skewness spectrale	1	S34	Skewness enveloppe spectrale	1
S24	Kurtosis spectrale	1	S35	Kurtosis enveloppe spectrale	1
S25	Centroïde spectrale	1	S36	Centroïde enveloppe spectrale	1
S26	Spread spectrale	1	S37	Spread enveloppe spectrale	1
S27	Flatness spectrale	1	S38	Flatness enveloppe spectrale	1
S28	Crest Factor Spectrale	1	S39	Crest Factor env. spectrale	1
S29	Slope Spectrale	1	S40	Slope enveloppe spectrale	1
S30	Decrease Spectrale	1	S41	Decrease enveloppe Spectrale	1
S31-32	Roll off à 85 % et 50 %	2	S42-43	Roll off env. 85 % et 50 %	2
S44-54	Modélisation param. ordre 2	11	S55-62	Bosse de bruit basse fréquence	8
<i>Présence de raies</i>					
S63-76	Présence de raies : 0 - 300 Hz	12	S75-86	Présence de raies : 300 Hz - 2 kHz	12
S87-98	Présence de raies : 2 - 10 kHz	12			

Table 35 : Liste des descripteurs spectraux

Descripteurs de la structure Harmonique :

Indice	Nom du paramètre	Nb	Indice	Nom du paramètre	Nb
H0	Nb. harmonique	1	H4	Noisiness bande 2 – 10 kHz	1
H1	Ind. harmonique le +énergétique	1	H5	Odd to Even harmonique Energie	1
H2	Noisiness bande 0 – 300Hz	1	H6	Harmonique spectrale deviation	1
H3	Noisiness bande 300Hz-2 kHz	1	H7	Inharmonicité	1
Distribution harmonique			Enveloppe		
H8	Déviatoin standard h.	1	H19	Déviatoin standard env. h.	1
H9	Skewness harmonique	1	H20	Skewness env. harmonique	1
H10	Kurtosis harmonique	1	H21	Kurtosis enveloppe harmonique	1
H11	Centroïde harmonique	1	H22	Centroïde env. harmonique	1
H12	Spread harmonique	1	H23	Spread enveloppe harmonique	1
H13	Flatness harmonique	1	H24	Flatness enveloppe harmonique	1
H14	Crest Factor harmonique	1	H25	Crest Factor env. harmonique	1
H15	Slope harmonique	1	H26	Slope enveloppe harmonique	1
H16	Decrease harmonique	1	H27	Decrease enveloppe harmonique	1
H17-18	Roll off à 85 % et 50 %	2	H28-29	Roll off à 85 % et 50 %	2
		9	H30-48	Modélisation paramétrique ordre 4	19
H49-55	Paramètres de recherche de f_0	6	H56-67	Paramètres de répartitions des h.	12

Table 36: Liste des descripteurs de la distribution par harmonique

Descripteurs de la structure DEMON :

Indice	Nom du paramètre	Nb	Indice	Nom du paramètre	Nb
Temporelle					
D0	Centroïde temporel	1	D3	Kurtosis temporelle	1
D1	Roll-off temporel	1	D4	Skewness temporelle	1
D2	Déviatoin standard temporelle	1			
Spectre					
D5	Déviatoin standard spectre DEMON	1	D11	Crest Factor spectre DEMON	1
D6	Skewness spectre DEMON	1	D12	Slope spectre DEMON	1
D7	Kurtosis spectre DEMON	1	D13	Decrease spectre DEMON	1
D8	Centroïde spectre DEMON	1	D14-15	Roll off à 85 % et 50 %	2
D9	Spread spectre DEMON	1	D16-26	Raie DEMON	11
D10	Flatness spectre DEMON	1			

Table 37 : Liste des descripteurs de l'analyse DEMON

Indice	Nom du paramètre	Nb	Indice	Nom du paramètre	Nb
MFCC Coef			MFCC enveloppe		
M0-39	Coefficient MFCC	40			
M40	Déviatoin standard MFCC	1	M63	Déviatoin standard env. MFCC	1
M41	Skewness MFCC	1	M64	Skewness enveloppe MFCC	1
M42	Kurtosis MFCC	1	M65	Kurtosis enveloppe MFCC	1
M43	Centroïde MFCC	1	M66	Centroïde enveloppe MFCC	1
M44	Spread MFCC	1	M67	Spread enveloppe MFCC	1
M45	Flatness MFCC	1	M68	Flatness enveloppe MFCC	1
M46	Crest Factor MFCC	1	M69	Crest Factor enveloppe MFCC	1
M47	Slope MFCC	1	M70	Slope enveloppe MFCC	1
M48	Decrease MFCC	1	M71	Decrease enveloppe MFCC	1
M49-51	Roll off à 85 % et 50 %	2	M72-73	Roll off à 85 % et 50 %	2
M52-62	Modélisation param. ordre 2	11			
M77-80	Amortissement MFCC	4	M74-76	Amortissement enveloppe MFCC	4

Table 38: Liste des descripteurs de l'analyse des MFCC

Descripteurs de la structure cepstrale :

Indice	Nom du paramètre	Nb	Indice	Nom du paramètre	Nb
C0	Déviation standard cepstre	1	C7	Slope cepstre	1
C1	Skewness cepstre	1	C8	Decrease cepstre	1
C2	Kurtosis cepstre	1	C9-10	Roll off à 85 % et 50 %	2
C3	Centroïde cepstre	1	C11-29	Modélisation paramétrique ordre 4	19
C4	Spread cepstre	1	C30-33	Amortissement env. cepstre	4
C5	Flatness cepstre	1	C34-37	Amortissement cepstre	4
C6	Crest Factor cepstre	1	C38-39	Rupture spectrale	2

Table 39 : Liste des descripteurs de l'analyse du cepstre

Descripteurs Spectrogramme :

Indice	Nom du paramètre	Nb	Indice	Nom du paramètre	Nb
L0	Peak power	1	L12	Power standard deviation	1
L1	Average power	1	L13	Power standard deviation - time	1
L2	Time of peak power	1	L14	Power standard deviation - frequency	1
L3	Frequency of peak power	1	L15	Power skewness	1
L4	Mean frequency	1	L16	Power skewness - time	1
L5	RMS bandwidth	1	L17	Power skewness - frequency	1
L6	Frequency skewness	1	L18	Power kurtosis	1
L7	Frequency kurtosis	1	L19	Power kurtosis - time	1
L8	Mean time	1	L20	Power kurtosis - frequency	1
L9	RMS time	1	L21	Rate of attack	1
L10	Temporal skewness	1	L22	Rate of decay	1
L11	Temporal kurtosis	1			

Table 40 : Liste des descripteurs de sur les spectrogrammes

Descripteurs de la structure de paquet d'ondelette :

Indice	Nom du paramètre	Nb	Indice	Nom du paramètre	Nb
W0	Déviation standard WP	1	W6	Crest Factor WP	1
W1	Skewness WP	1	W7	Slope WP	1
W2	Kurtosis WP	1	W8	Decrease WP	1
W3	Centroïde WP	1	W9-10	Roll off à 85 % et 50 %	2
W4	Spread WP	1	W11-33	Modélisation paramétrique AR ordre 5	23
W5	Flatness WP	1			

Table 41 : Liste des descripteurs de la distribution par paquet d'ondelette

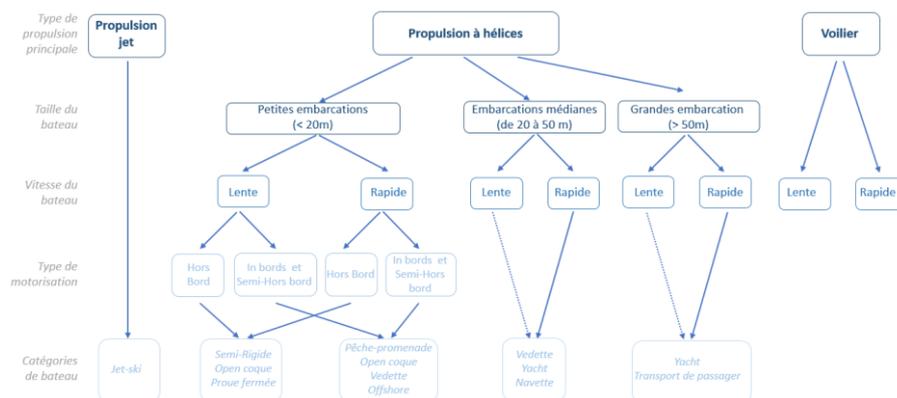
Les paramètres de forme ont été automatiquement appliqués à l'ensemble des espaces de représentation dans un objectif d'établir une liste de descripteurs la plus exhaustive possible. Ainsi, la liste de descripteurs acoustiques présente un large choix de descripteurs acoustiques. Les 383 descripteurs sont répartis selon 8 catégories : 11 descripteurs temporels, 99 descripteurs spectraux, 68 descripteurs de la distribution d'harmoniques, 27 descripteurs issue de l'analyse DEMON, 81 descripteurs des MFCC, 40 descripteurs cepstraux, 23 descripteurs du spectrogramme et 34 descripteurs des paquets d'ondelettes. Ce choix des descripteurs est volontairement large dans un objectif futur de sélection des descripteurs la plus pertinente.

En contrepartie, cette liste de descripteurs semble présenter des redondances inter et intra catégories. La pertinence de certains descripteurs nous interroge concernant l'étude de l'enveloppe des MFCC et de la structure d'harmonique, l'étude de la structure d'ondelettes et l'étude du spectre DEMON. Ces descripteurs sont toutefois conservés et leur pertinence jugée lors de la suite de l'étude.

7.2.3 Protocole pour la création de l'arborescence de classification

Les paramètres descripteurs de la catégorie de bateaux permettent de séparer en plusieurs classes les bateaux de la base de données avec vérité terrain. Dans [Allen_2012] et [Simard_2016a], les bateaux sont classés en fonction de leurs tailles et de leurs usages : cargo, tanker, bateau de pêche. [Allen_2012] fait apparaître la notion de vitesse pour l'une de ses classes. La création d'une arborescence de classification consiste à réaliser une hiérarchie entre les différents paramètres descripteurs de la catégorie de bateaux. La non unicité dans le choix de hiérarchie entre les différents paramètres descripteurs des bateaux conduit à la réalisation de plusieurs arborescences toutes aussi valides les unes que les autres. La Figure 85 présente un exemple d'arborescence utilisant 5 paramètres descripteurs des bateaux (le type de propulsion principale, la taille du bateau selon trois catégories, la vitesse du bateau (lent – rapide), le type de moteur puis le type de bateau). D'autres classifications utilisant moins de descripteurs sont tout aussi pertinentes : l'Arborescence n°2 : le type de propulsion principale, la taille du bateau selon trois catégories, la vitesse du bateau (lent – rapide) – Arborescence n°3 : le type de propulsion principale, la taille du bateau selon trois catégories, le type de bateau, la vitesse du bateau (lent – rapide).

Arborescence de classification 1



Arborescence de classification 2

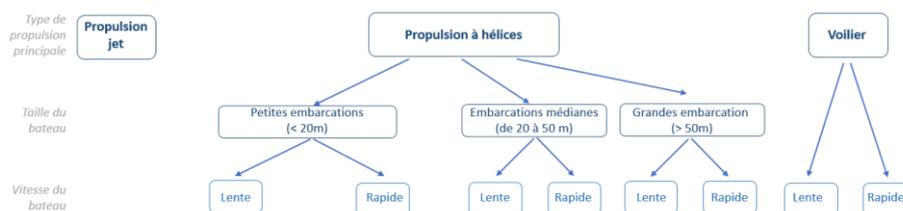


Figure 85 : Exemples d'arborescence de classification de bateaux

Ce non unicité montre la complexité à créer une arborescence idéale permettant la classification absolue et unique des bateaux. De plus, cette classification doit être en accord avec des critères acoustiques identifiables. Un protocole spécifique permettant de créer un arbre de classification a été mise en place. Pour chaque ramification de l'arbre, le choix du paramètre physique ou contextuel déterminant décrivant les bateaux est réalisé en suivant la méthode suivante :

- L'estimation de la corrélation les paramètres physiques et contextuels des bateaux et de paramètres descripteurs des données acoustiques,
- La sélection d'un sous-ensemble de paramètres maximisant la corrélation pour chaque paramètre décrivant les bateaux,
- L'affichage de chaque sous-ensemble par ACP,
- La sélection des paramètres physiques ou contextuels permettant une meilleure séparabilité sur critère visuelle.

7.3 Aptitude des descripteurs acoustiques à différencier des classes correspondant à chaque paramètre descriptif des bateaux

7.3.1 Redondance des descripteurs acoustiques

La Figure 86 représente la matrice d'autocorrélation des descripteurs acoustiques centrées et réduites, réalisées ne considérant le coefficient de corrélation de Pearson. L'identification des couples fortement corrélés est facilitée par l'application de 3 seuils à cette matrice.

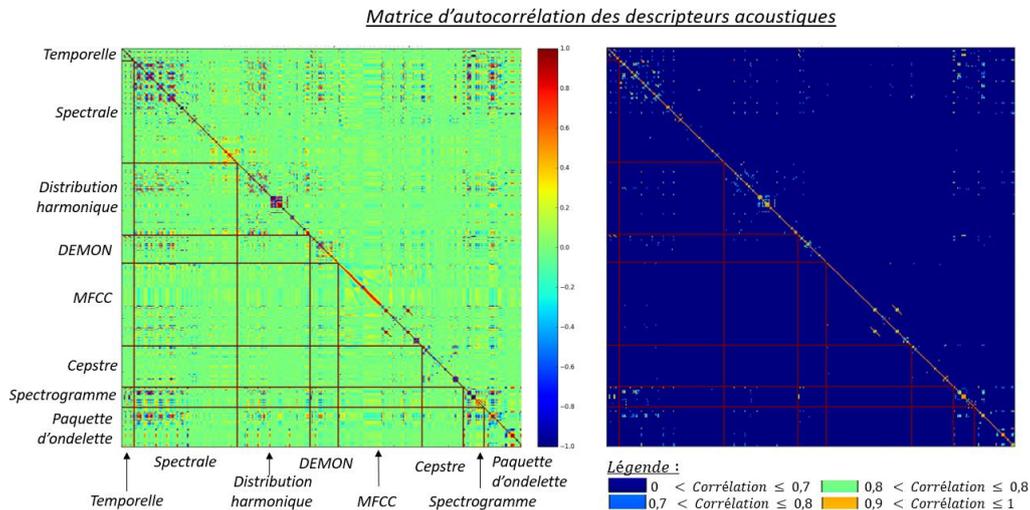


Figure 86 : Matrice d'autocorrélation des descripteurs acoustiques (à gauche) et avec application des seuils (à droite)

L'analyse globale de la matrice d'autocorrélation montre que sur les 136900 combinaisons testées, 620 couples de descripteurs acoustiques ont une corrélation supérieure à 0.7 et 138 couples ont une corrélation supérieure à 0.9. Les 138 couples de descripteurs correspondant à une forte corrélation sont issus de 140 descripteurs différents. 17 de ces descripteurs traduisent une forte redondance et ont une corrélation de plus de 0,9 avec au minimum 4 autres descripteurs (T6, T7, S0, S3, S14, S22, S44, S52, H8, H40, L1, L4, L8, L9, L10, L11, W0).

La matrice d'autocorrélation peut être analysée par « blocs » correspondant aux différentes méthodes d'analyse. Cette analyse permet alors d'étudier la dépendance d'attributs pour un domaine d'analyse et d'évaluer la présence de redondance entre les différents domaines. Les plus fortes valeurs de corrélations « intra-domaine d'analyse » sont principalement observées au sein des descripteurs acoustiques issue de l'analyse spectrale et de l'analyse de la distribution d'harmonique. Plus précisément, ces fortes corrélations correspondent aux descripteurs décrivant la distribution de la PSD et de son enveloppe dans les deux bandes de fréquences, ainsi que les descripteurs issus de la modélisation paramétrique de l'enveloppe de la distribution d'harmonique. De fortes corrélations sont aussi observées « inter-domaine d'analyse ». Ces observations concernent à chaque fois l'analyse spectrale, pour les paramètres précédemment cités auquel s'ajoutent les paramètres issus de la modélisation paramétrique. Ces descripteurs ont alors une forte corrélation avec des paramètres issues de l'analyse temps-fréquence, ce qui été attendu, mais aussi avec l'analyse par ondelette et l'étude de la distribution d'harmoniques. Il est à noter que l'utilisation de l'analyse cepstrale semble apporter des informations complémentaires aux autres domaines : la corrélation entre des descripteurs du cepstre ou des coefficients MFCC ont une faible corrélation, entre eux et avec l'analyse spectrale.

7.3.2 Robustesse des descripteurs acoustiques par rapport aux effets de propagation

Les descripteurs acoustiques ont été estimés sur 10 intervalles temporels plus ou moins éloignés du passage au plus près du bateau. Les effets induits lors de la propagation du bruit rayonné des bateaux sur les descripteurs acoustiques sont donc observables lors de la comparaison des 10 résultats correspondant à un seul passage de bateau. Cette comparaison est réalisée à l'aide d'un indicateur simple permettant de quantifier les variations observées pour un bateau par rapport à celle induit par l'ensemble de la flottille. Cet indicateur correspond au ratio entre les variations observées pour un même passage de bateau et celles observées pour l'ensemble des passages de bateaux. Afin d'écartier les valeurs les plus fortes, les variations de l'ensemble des bateaux correspondent à la différence entre le 90^{ème} et 10^{ème} centile. Plus cet indicateur est faible, plus les effets de la propagation sont négligeables au regard des variations induites par la diversité acoustique des bateaux.

La Figure 87 représente le ratio pour l'ensemble des bateaux ainsi que les valeurs médianes, du 25^{ème} et du 75^{ème} centile pour l'ensemble de la flottille. Pour un même descripteur, une homogénéité du ratio est observée parmi la flottille. Les valeurs médianes oscillent entre 0,03 et 0,5. En moyenne pour l'ensemble des descripteurs acoustiques, 25 % des passages de bateaux ont un ratio inférieur à 0,12 ou un ratio supérieur à 0,41.

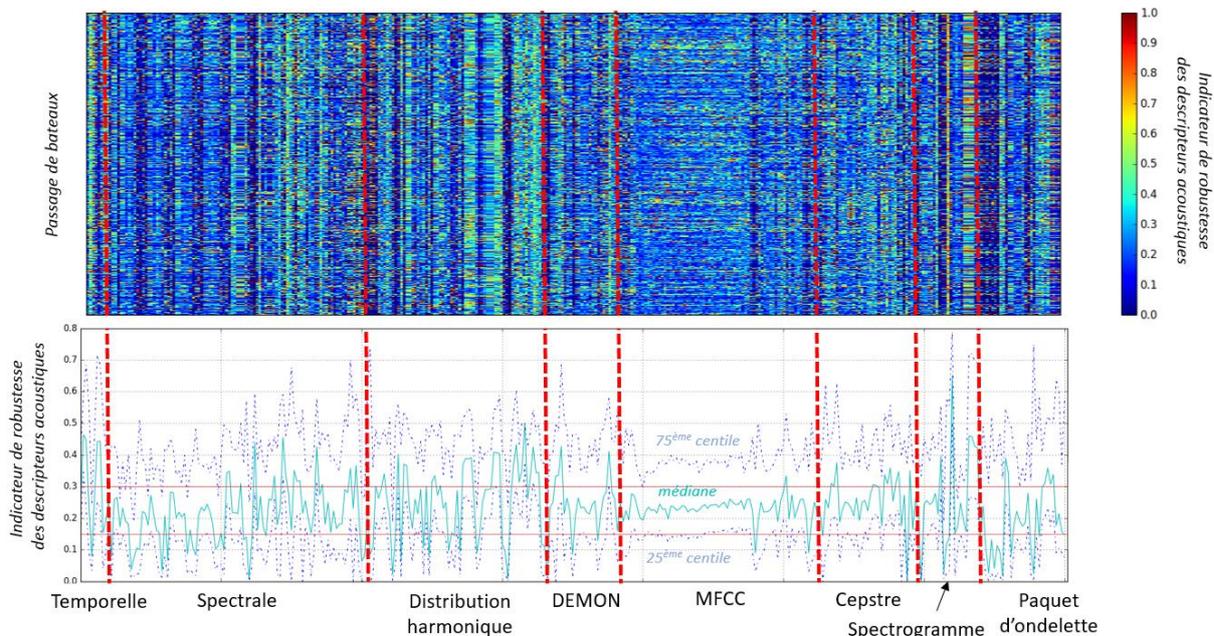


Figure 87 : Indicateur de la robustesse des descripteurs acoustiques par rapport aux effets de propagation pour l'ensemble des bateaux (en haut), et les valeurs médianes, du 25^{ème} et 75^{ème} centile de cet indicateur (en bas)

La Table 42 présente la liste des descripteurs acoustiques plus ou moins robustes à la propagation au regard de cet indicateur, selon le critère sélectionné pour déterminer la robustesse. Ces descripteurs plus ou moins robustes aux effets de propagation sont issus de 3 espaces de représentation : l'analyse spectrale (31,1 % des moins robustes et 20% des plus robustes), de l'analyse par harmonique (26.2% des moins robustes et 35.7% des plus robustes) et de l'analyse par paquet d'ondelette (21.3 % des moins robustes et 10% des plus robustes). Les descripteurs issus de l'analyse cepstrale représentent aussi 10 % des descripteurs les plus robustes.

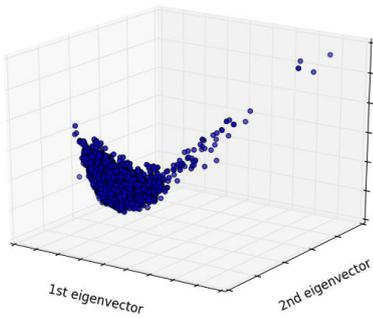
Descripteurs acoustiques les plus robustes aux effets de propagation <i>Valeur médiane de l'indicateur < 0.15</i>	Descripteurs acoustiques les moins robustes aux effets de propagation <i>Valeur médiane de l'indicateur > 0.3</i>
61 descripteurs :T4 S0 S7 S8 S9 S12 S20 S24 S31 S34 S36 S44 S45 S48 S56 S57 S58 S59 S64 S98 H0 H2 H3 H10 H11 H13 H23 H25 H32 H34 H36 H42 H52 H53 H54 H67 D0 D1 D10 D20 M52 M76 C2 C37 L2 L11 L12 L13 W1 W3 W4 W5 W6 W7 W8 W9 W13 W20 W21 W24 W33	70 descripteurs : T1 T2 T6 T7 S49 S50 S55 S60 S67 S70 S71 S74 S75 S76 S82 S84 S94 S96 H4 H7 H12 H15 H16 H24 H26 H27 H29 H37 H38 H39 H40 H48 H49 H51 H56 H57 H58 H59 H60 H63 H64 H65 H66 D4 D5 D6 D25 M66 C6 C8 C25 C26 C29 C30 C31 C33 C34 C38 L10 L14 L20 L21 L22 W0 W11 W12 W26 W27 W28 W29

Table 42 : Descripteurs acoustiques les plus et moins robustes aux effets de propagation

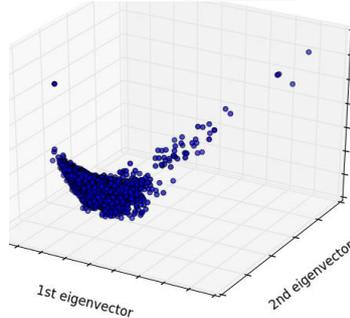
7.3.3 Relation entre les descripteurs acoustiques et les paramètres descriptifs du bateau

L'analyse par composante principale permet de réduire l'espace dimension dans un objectif de visualisation des données. En considérant l'ensemble des descripteurs acoustiques, 50 % de la variance des observations est obtenue pour les 16 premières composantes principales. Ainsi, la visualisation des trois premières composantes permet d'observer 22.29 % de la variance et forme un unique nuage de points compact s'élargissant dans les deux directions non colinéaires. Cette forme principale est conservée pour le second triplet de composante principale.

ACP – composantes 1, 2 et 3
22,29 % de la variance observée



ACP – composantes 1, 2 et 4
22,27 % de la variance observée



ACP – composantes 2, 3 et 4
13,19 % de la variance observée

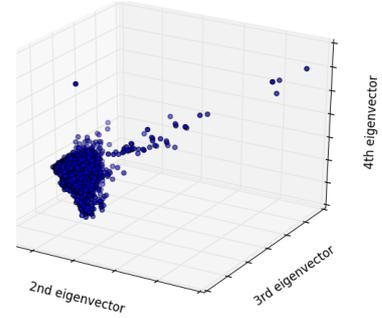


Figure 88: Affichages des trois triplets de composantes principales pour l'ensemble des descripteurs acoustiques

L'affichage du premier triplet de composantes principales en fonction des caractéristiques physiques et contextuelle des bateaux permet d'étudier la distribution de chaque catégorie dans le nuage de points. Ne représentant cependant moins de 25 % de la variance totale, les résultats de cette observation restent fortement limités. Aucune caractéristique liée aux bateaux ne présente de segmentation marquée permettant d'isoler des classes : un des sous-ensembles est réparti sur l'ensemble du nuage de points. Pour les paramètres liés à la variation de vitesse et à la direction d'arrivée toutes les sous-catégories sont réparties sur l'ensemble du nuage de points. Quelques éléments notables sont toutefois observés pour les autres catégories. Seuls les bateaux dont la propulsion principale est à moteur et étant équipés de moteur hors-bord sont représentés dans la direction la moins dense du nuage de points, correspondant alors aux catégories semi-rigide et open coque. Plus la longueur, la distance par rapport au CPA ou la vitesse du bateau augmente, plus les points sont localisés vers l'extrémité de la direction la plus dense. Cette observation est en cohérence direct avec le positionnement des catégories de bateaux dans le nuage de points. En revanche, les jet-skis sont aussi localisés vers cette extrémité (Figure 42).

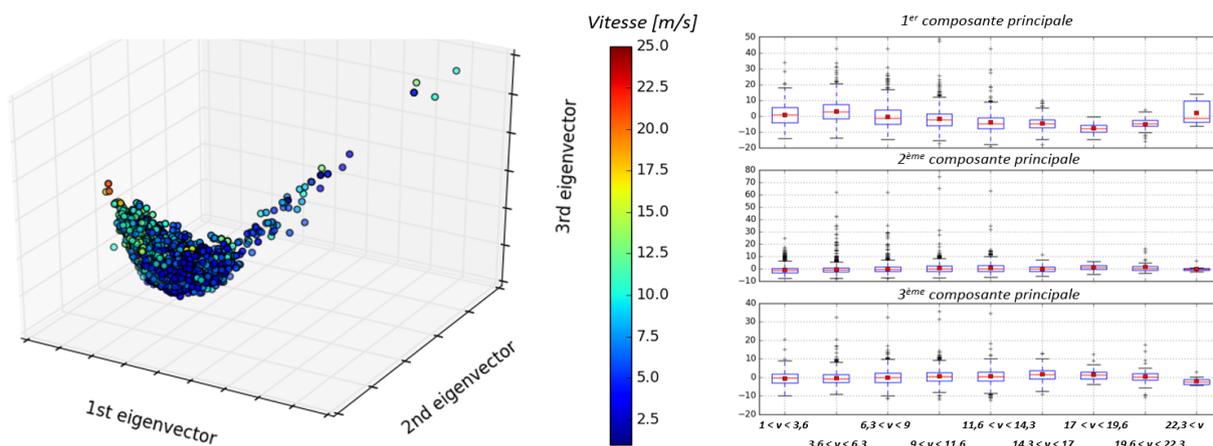


Figure 89 : Affichage des 3 premières composantes principales en fonction de la vitesse au CPA

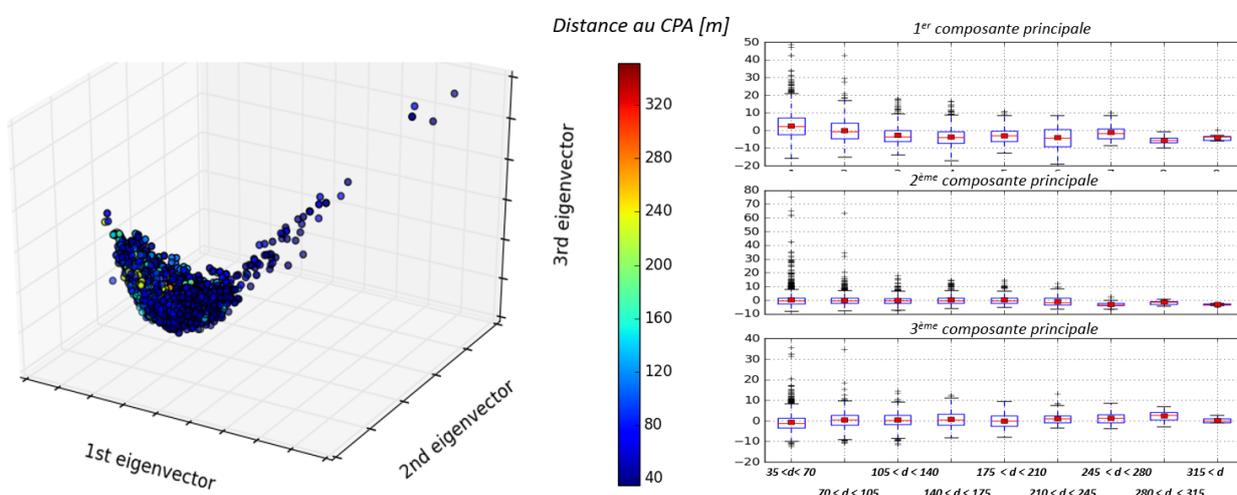


Figure 90 : Affichage des 3 premières composantes principales en fonction de la distance au CPA

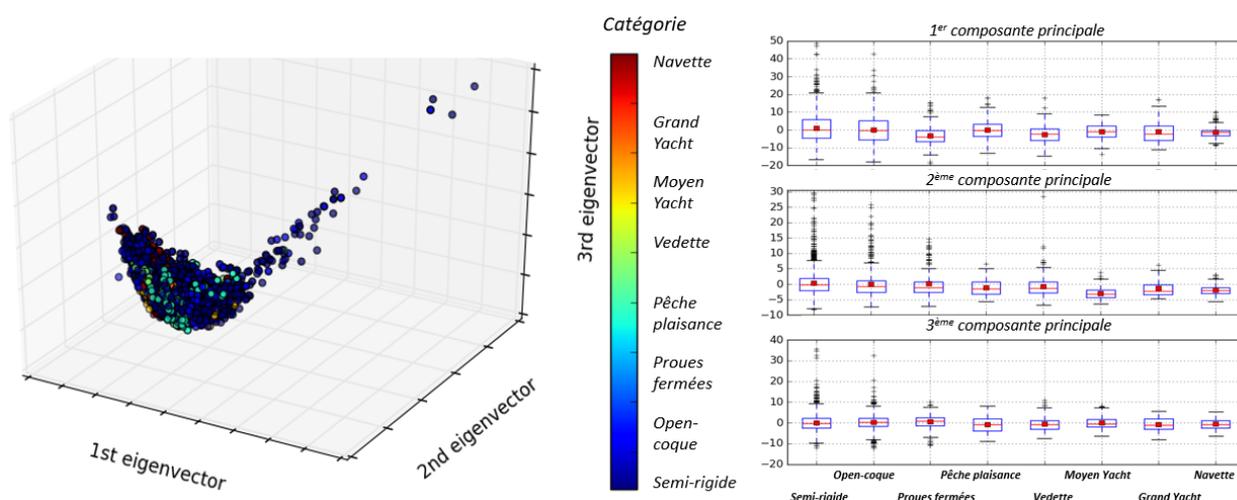


Figure 91 : Affichage des 3 premières composantes principales en fonction de la catégorie de bateaux

La Table 43 synthétise les informations issues de l'ACP appliquée individuellement aux descripteurs acoustiques issus de chaque méthode d'analyse. *Nb* représente le nombre de composantes principales permettant d'observer 50 % de la variance et *Var* représente le pourcentage de variance expliquée par

les trois premières composantes principales (CP). Comme précédemment, aucune séparation entre catégories n'est bien marquée. Quelques éléments différenciant apparaissent toutefois.

	Nb	Var	Lien avec les paramètres descriptifs du bateau
Temporelle	2	66.25%	Seuls les bateaux de propulsion principale moteur et de type semi-rigide/open coque ne sont pas seulement dans la pointe avant gauche. Plus le bateau est long ou proche, plus les pointes sont localisées dans la pointe avant gauche. Pour les bateaux rapides, les points se rapprochent de cette pointe.
Spectrale	6	35.42%	Plus un bateau est proche ou rapide, plus les points sont sur la partie négative de la 1ère composante principale. Pour les grandes embarcations, les points sont plus proches du barycentre du nuage.
Distribution d'harmonique	4	42.07%	Les points sont plus proches du barycentre du nuage lors la longueur et la distance augmente (cohérence avec les catégories).
DEMON	3	48.00%	Les bateaux équipés de moteur in-bord ont globalement des valeurs plus faibles selon la deuxième composante. Plus la longueur et la distance du bateau est faible, plus les points sont proches du barycentre (cohérence avec les catégories).
MFCC	7	25.72%	Le nuage de points est plus étalé pour les bateaux équipés de moteur hors-bord, pour les catégories de petits bateaux et lorsque la distance ou la vitesse diminue.
Cepstre	5	33.34%	Plus la longueur et la distance augmentent, plus les valeurs sont proches de barycentre (en cohérence avec les catégories).
Spectrogramme	1	62.60%	Eloignement du barycentre plus important pour les bateaux de propulsion principale motorisée et équipés de moteur hors bords, principalement pour les semi-rigide. Rapprochement du barycentre lorsque la longueur, la distance et la vitesse diminue.
Paquet d'ondelette	2	52.68%	Les valeurs les plus éloignées sont obtenues pour des bateaux proches, de vitesses inférieures à 13 m/s, de faible longueur et de propulsion principale motorisée (type semi-rigide ou open coque). Les valeurs sur la 3 ^{ème} composantes principales diminuent lorsque la longueur du bateau augmente.

Table 43 : Synthèse des informations relatives à l'ACP par domaine d'analyse

La diversité observée dans le chapitre 6 se retrouve lors de l'analyse des descripteurs acoustiques. La visualisation des trois premières composantes principales de l'ACP estimée sur l'ensemble (ou des sous-ensembles par espace de représentation) ne permet pas une segmentation du nuage des points en fonction des paramètres descriptifs des bateaux. Globalement, un seul nuage de points est observé. Des modifications de l'occupation dans le nuage de points sont toutefois observées lors de la variation d'un paramètre descriptif du bateau. Ces modifications se traduisent par un éloignement des individus par rapport au barycentre ou à une extrémité du nuage de points. Cet éloignement n'est cependant pas généralisable et dépend du sous-ensemble de descripteurs acoustiques étudiés. Les descripteurs acoustiques les plus pertinents individuellement sont sélectionnés.

Pour les paramètres quantitatifs descriptifs du bateau (la longueur du bateau, sa vitesse et sa distance par rapport au point d'écoute) l'étude des relations avec les descripteurs acoustiques est réalisée par estimation de la corrélation de Spearman et analyse par *scatter-plot*. Il est à noter que l'évolution du coefficient de corrélation en fonction de l'angle formé par le bateau est identique à celle observée en fonction de la distance au CPA. Les plus fortes valeurs de corrélation observées sont obtenues lors de la comparaison entre les descripteurs acoustiques et la distance au CPA : un maximum de 0,45 est observé pour le paramètre *Déviation standard de l'enveloppe temporelle* T8. La comparaison entre la vitesse de bateau et les descripteurs acoustiques présente un maximum de corrélation de 0,41 pour le paramètre *Frequency skew* L6. En revanche, bien que la longueur du bateau semble être le facteur le plus discriminant lors de l'analyse menée dans le chapitre précédant, les valeurs de corrélation observées sont moindres : un maximum de 0,18 est obtenu pour les paramètres roll off de l'enveloppe

des coefficients MFCC M47. Il est à noter que la corrélation entre les catégories de bateau et les descripteurs présents des valeurs supérieures à 0.3.

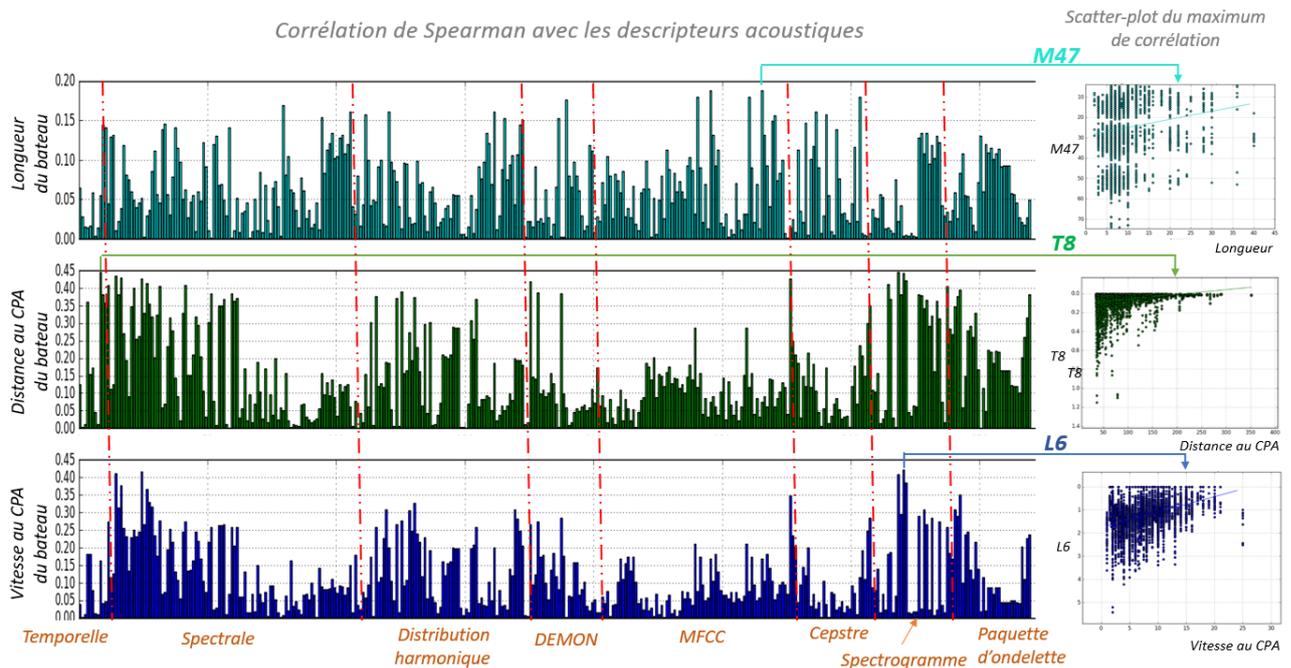


Figure 7 : Corrélation de Spearman entre les descripteurs acoustiques et les paramètres quantitatifs descriptifs du bateau, ainsi que l'affichage des scatter-plots pour chaque maximum de corrélation

La Table 44 liste les descripteurs acoustiques individuellement discriminant obtenus pour les trois paramètres, en fonction des valeurs de corrélations. Une différence est observée entre les coefficients fortement corrélés pour la vitesse et la distance de ceux observés pour la largeur de bateau. Les descripteurs acoustiques en lien avec la distance et la vitesse sont principalement issus de l'analyse spectrale ou temps-fréquence. Dans le cas de la distance au CPA, les paramètres semblent refléter une augmentation de l'énergie (le paramètre déviation standard apparaît 7 fois sur 15) puis la modification de la répartition de l'énergie (*centroïde* et *flatness*). Le facteur vitesse semble refléter d'avantage le deuxième aspect : 3 centroïde sur les 4 paramètres. Les paramètres de plus forte corrélation dans le cas de la longueur du bateau présentent davantage de diversité en termes de domaine d'analyse et de type de paramètre.

	Corrélation > 0.4	0.4 > Corrélation > 0.3
Distance du bateau	15 descripteurs: T8, S0, S3, S5, S14, S16, S22, S33, D2, C0, L0, L4, L6, L7, W0	47 descripteurs: T3, T9, T10, S4, S9, S11, S15, S17, S18, S20, S26, S31, S37, S42, S44, S47, S48, S49, S52, S53, S54, H7, H9, H18, H20, H25, H31, H47, H49, D5, D14, C33, L1, L5, L12, L13, L14, L15, L17, L19, L20, W3, W4, W5, W12, W32, W33
Vitesse du bateau	4 descripteurs: S3, S14, L4, L6	14 descripteurs: S4, S5, S16, S17, S18, H13, H23, H25, H64, C0, L7, L14, W3, W5
Corrélation > 0.16		
Largeur du bateau	11 descripteurs : S72, S98, H15, H56, D17, M41, M47, M63, M69, C12, C29	

Table 44 : Liste de descripteurs discriminant au vu de résultats de corrélation

Les figures ci-dessous (Figure 92 à Figure 94) représentent une visualisation des trois premiers composants de l'ACP en considérant les paramètres présents dans le tableau ci-dessus. Dans le cas des paramètres de plus forte corrélation avec la distance, plus la distance est grande (couleur chaude) plus les individus sont présents sur l'axe montant selon la 3^{ème} composante, et se rapproche du centre de

gravité des points. En ce qui concerne les résultats obtenus en fonction de la vitesse du bateau, les faibles vitesses (couleurs froides) sont réparties dans l'ensemble du nuage de points, mais d'avantage localisé à droite. Plus les valeurs de vitesse augmentent (couleurs chaudes), plus les individus se retrouvent localisés sur la partie gauche de la figure. La répartition des individus en fonction de la longueur est plus difficilement observable sur l'analyse par ACP : les bateaux de faible longueur (couleur froide) sont répartis sur l'ensemble du nuage de points alors que les bateaux présentant une longueur plus importante (couleur chaude) se localisent sur la partie inférieure du nuage de points.

La vitesse du bateau au CPA (81,72 % de variance observée)

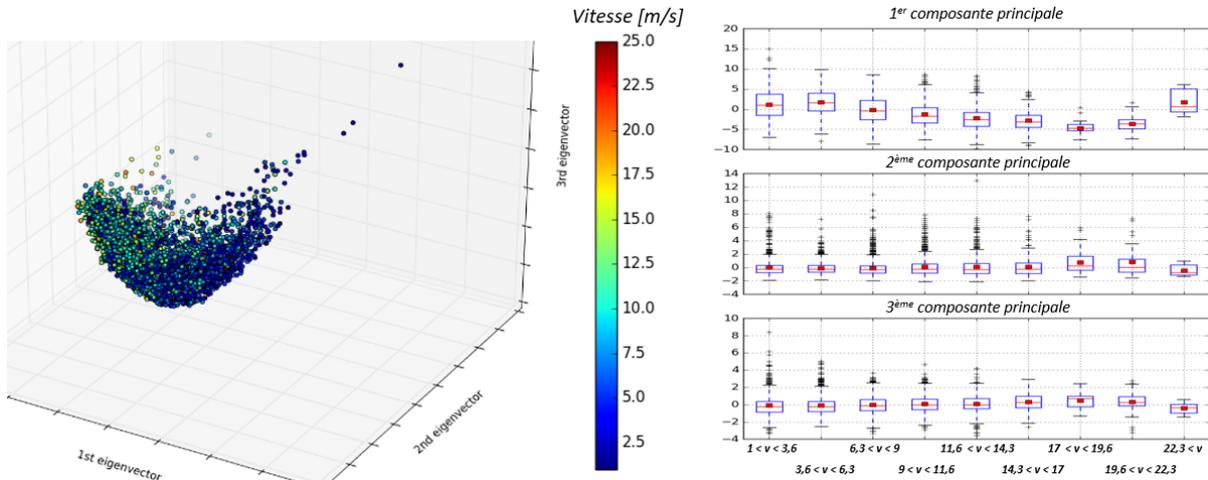


Figure 92 : 3 premières composantes principale de l'ACP pour les paramètres liés à la vitesse du bateau

La distance du bateau au CPA (65,00 % de variance observée)

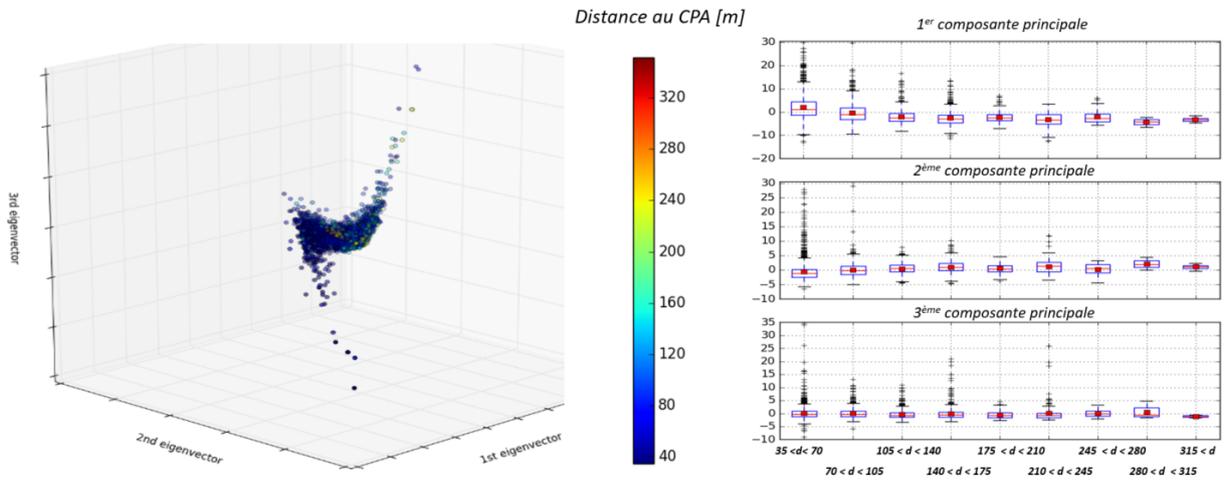


Figure 93 : 3 premières composantes principale de l'ACP pour les paramètres liés à la distance du bateau

La longueur du bateau (63,61 % de variance observée)

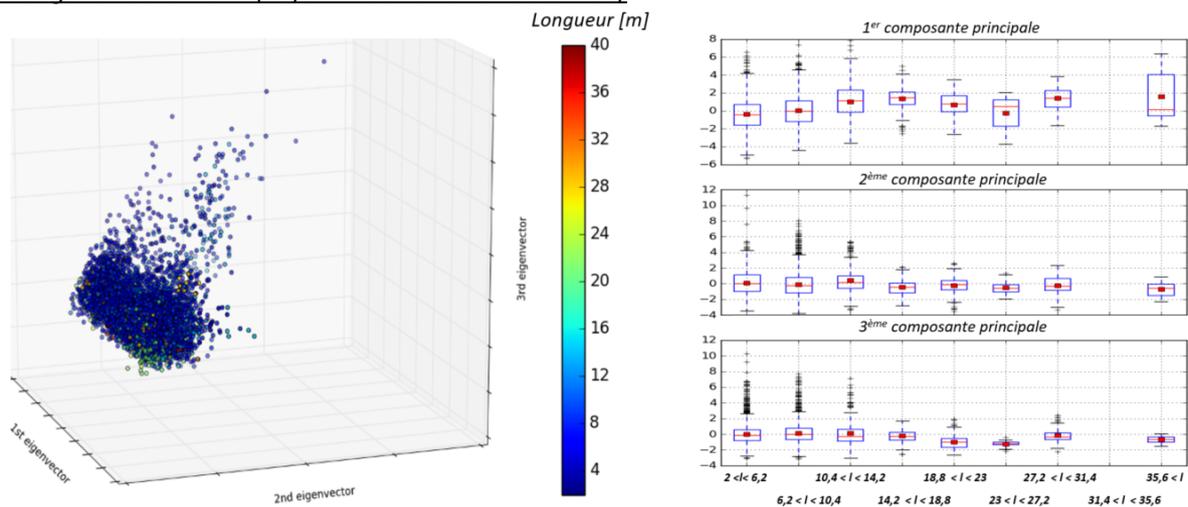


Figure 94 : 3 premières composantes principale de l'ACP pour les paramètres liés à la longueur du bateau

L'analyse des diagrammes box plot permet d'observer la répartition des descripteurs acoustiques, à la fois quantitatifs et qualitatifs, en fonction des paramètres qualitatifs décrivant le bateau : type de moteur, catégorie (voir 7.2.1 p 149). Un critère simple est introduit pour caractériser ces observations. Ce critère traduit la séparabilité entre deux diagrammes box-plot pour un même paramètre décrivant le bateau. Le sous-ensemble associé à une valeur du paramètre qualitatif du bateau est étudié individuellement en utilisant un boxplot. Pour un même paramètre descripteurs du bateau, les différents box-plot sont comparés deux à deux. Le critère correspond au ratio entre la différence minimale entre le 75^{ème} et le 25^{ème} percentile et la largeur de l'intervalle interquartile (valeur du 75^{ème} centile moins la valeur du 25^{ème} centile). Plus le critère est faible, plus les valeurs relatives des deux quartiles sont distinctes. Lorsqu'un paramètre qualitatif décrivant le bateau peut prendre plus de 2 valeurs, la valeur minimale de ce critère entre les différentes comparaisons est retenue. La Figure 95 représente ce critère pour les différents descripteurs acoustiques.

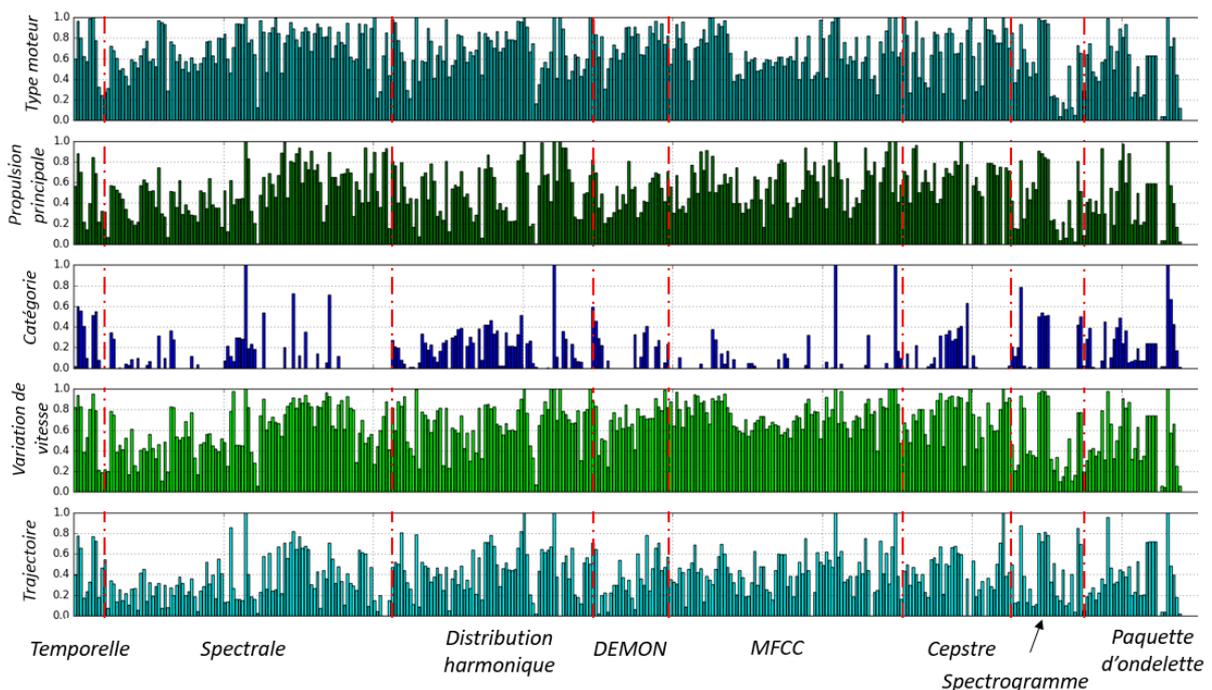


Figure 95 : Critère de comparaison des diagrammes box-plots

La Table 45 présent la liste de paramètres dont les distributions présentant de fortes différences par comparaison du critère à deux seuils. Peu de descripteurs permettent une séparation différenciant pour les paramètres type moteur et variation de vitesse. L'analyse par catégorie présente un nombre important de descripteurs acoustiques dont deux des distributions peuvent être différenciées : 175 descripteurs acoustiques ont une valeur de critère nul et sont issue d'un mélange homogène entre les différentes méthodes d'analyse.

	critère < 0.05	0.05 < critère < 0.1
Moteur de moteur	<u>4 descripteurs</u> : L15, W26, W27, W28	<u>1 descripteur</u> : L19
Propulsion principale	<u>14 descripteurs</u> : S54, H49, M73, C23, C25, C30, C36, L15, L20, W8, W26, W27, W28, W33	<u>6 descripteurs</u> : S0, S22, H8, H30, L9, L14
Catégorie de bateaux	<u>214 descripteurs</u> : T0, T5, T9, T10, S0, S3, S4, S5, S6, S7, S9, S12, S13, S14, S16, S17, S19, S22, S25, S26, S27, S28, S29, S31, S33, S34, S35, S36, S37, S38, S39, S40, S41, S54, S55, S57, S58, S59, 60, S61, S62, S64, S65, S67, S69, S71, S72, S73, S75, S76, S79, S80, S82, S83, S84, S85, S86, S87, S88, S89, S90, S91, S92, S93, S94, S95, S96, S97, S98, H4, H5, H6, H7, H8, H20, H25, H29, H37, H38, H45, H48, H49, H50, H51, H52, H53, H54, H57, H60, H65, H66, H67, D4, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12, D13, D16, D20, D21, D24, M0, M1, M2, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M10, M11, M12, M13, M16, M18, M20, M22, M23, M24, M25, M26, M27, M28, M29, M30, M31, M32, M33, M34, M35, M37, M40, M41, M42, M43, M44, M46, M48, M49, M51, M52, M53, M55, M56, M58, M59, M60, M61, M62, M63, M64, M65, M66, M68, M70, M71, M73, M74, M75, M76, M77, M78, C1, C3, C4, C7, C8, C9, C11, C12, C14, C16, C23, C25, C27, C28, C29, C30, C31, C32, C33, C34, C35, C36, C37, C38, L3, L4, L5, L6, L7, L12, L13, L14, L15, L16, L17, L18, L19, L20, W0, W3, W4, W5, W8, W26, W27, W28, W33	<u>29 descripteurs</u> : T3, T6, T9, T10, S0, S2, S6, S9, S25, S31, S33, S39, S52, S71, S72, S73, S78, S85, S92, S93, S95, S97, H3, H29, H37, H38, H39, H41, H42
Variation de vitesse	<u>3 descripteurs</u> : C30, W26, W28	<u>4 descripteurs</u> : S54, H49, W25, W30
Trajectoire	<u>20 descripteurs</u> : S33, S54, S94, S96, S97, H20, H49, H57, D2, D5, M48, M70, C23, C25, C30, L20, W26, W27, W28, W33	<u>12 descripteurs</u> : S0, S11, S19, S22, S73, S89, H4, D4, D22, C31, L2, L7

Table 45 : Liste des critères les plus pertinents pour chaque classe de paramètre qualitatif

Les résultats de l'ACP pour les descripteurs où une forte différenciation est observée (< 0.05) montrent un regroupement difficilement interprétable lors de la visualisation des trois premières composantes principales pour les paramètres : *variation de vitesse* et *type de propulsion principale*. Le seul élément notable pour le paramètre *type de propulsion principale* est une plus forte dispersion pour les éléments correspond à une propulsion principale à hélice. En ce qui concerne la sensibilité aux trajectoires, malgré un nombre important descripteurs pouvant potentiellement séparer deux trajectoires, le résultat obtenu par ACP présent un unique nuage de points dont l'agencement ne présente pas de regroupement marqué. Pour les deux autres catégories, cette analyse ne permet pas d'isoler une caractéristique de bateau mais montre un regroupement pour des sous-ensembles (Figure 97). Dans le cas du type de moteur, les éléments correspondant au moteur type bord sont localisés à l'extrémité haute du nuage de points. En ce qui concerne les catégories de bateaux, plus le bateau est grand, plus les points sont concentrés vers le bas du nuage de points et vers le barycentre.

Le type de moteur du bateau (in ou hors-bord) (99,96 % de variance observée)

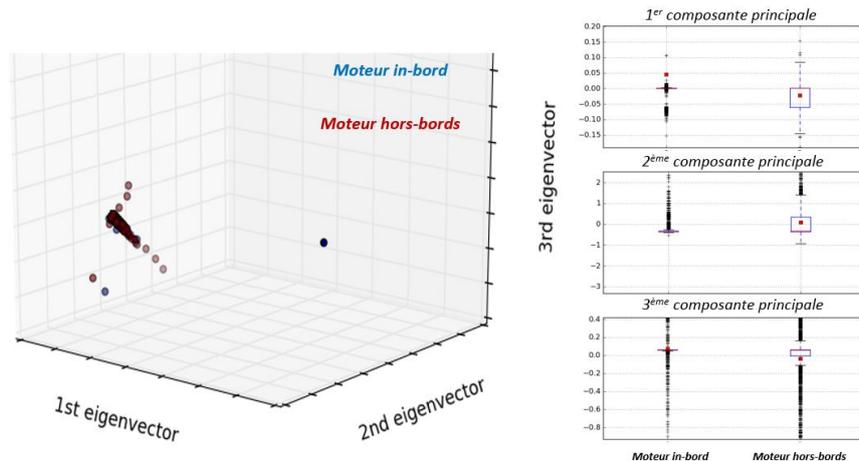


Figure 96 : ACP pour les descripteurs minimisant le critère d'étude en fonction du type de moteur (in ou hors bords) :

La catégorie de bateau (25,33 % de variance observée)

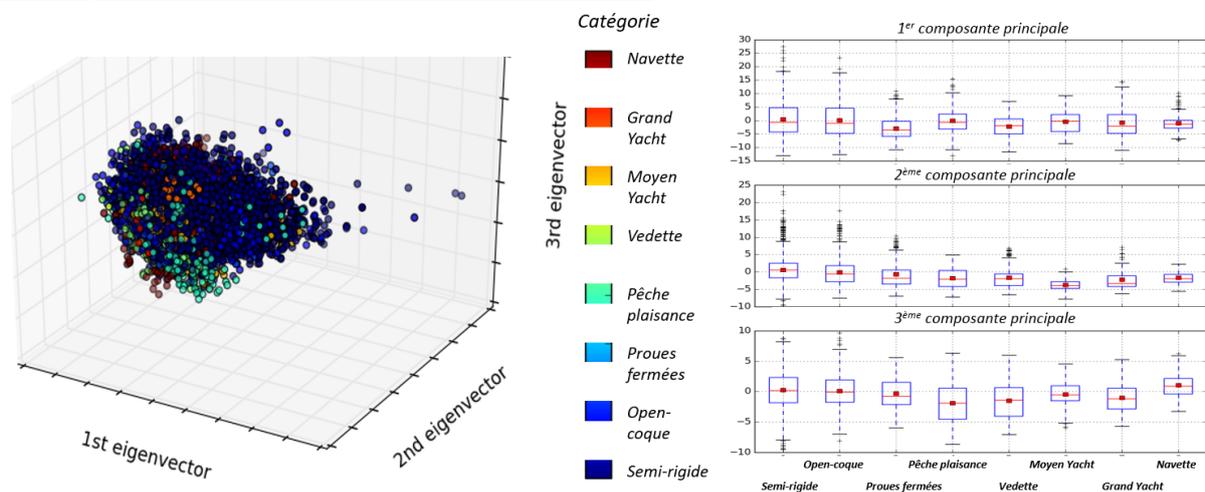


Figure 97 : ACP pour les descripteurs minimisant le critère d'étude en fonction du type de catégorie de bateaux

La visualisation des trois premières composantes principales de l'ACP de l'ensemble des paramètres ne permet pas une segmentation du nuage des points en fonction des caractéristiques du bateau. La sélection manuelle de descripteurs acoustique par corrélation ou analyse box plot ne modifie pas l'issue des résultats. La présence de singularité dans le regroupement spatial de certains sous-ensembles de paramètres descriptifs du bateau laisse envisager la possibilité d'isoler ces sous-ensembles par des algorithmes de classification dédiés. Cette étude permet d'identifier les paramètres descriptifs les plus influents : la distance au CPA, la vitesse du bateau, la longueur du bateau mais plus particulièrement la catégorie de bateau et le type de moteur.

7.3.4 Détermination de l'arborescence de classification

L'analyse réalisée dans le chapitre 6 a montré la forte influence du paramètre liée à la taille du navire à travers un regroupement des catégories. En dépit d'une corrélation plus faible avec les descripteurs acoustiques, ce paramètre est conservé en tant que premier élément de classification. Ce choix de classification est en accord avec les classes présentes dans la littérature. La base de données est divisée en deux catégories : les petites embarcations regroupant les catégories jets-ski, semi-rigide à pêche-promenade et les vedettes et les grandes embarcations, regroupant catégories navettes, médian et grand yacht, voilier. En considérant ce critère de taille, de par leurs grandes dimensions, les voiliers se

retrouvent avec les grandes embarcations, les plus bruyantes selon la littérature. Une première limite à cette arborescence de classification apparaît.

Cinq potentiels paramètres sont considérés pour la division des étages inférieures : la distance au CPA, la vitesse au CPA, la longueur, les catégories de bateau et le type de moteur (uniquement pour les petites embarcations).

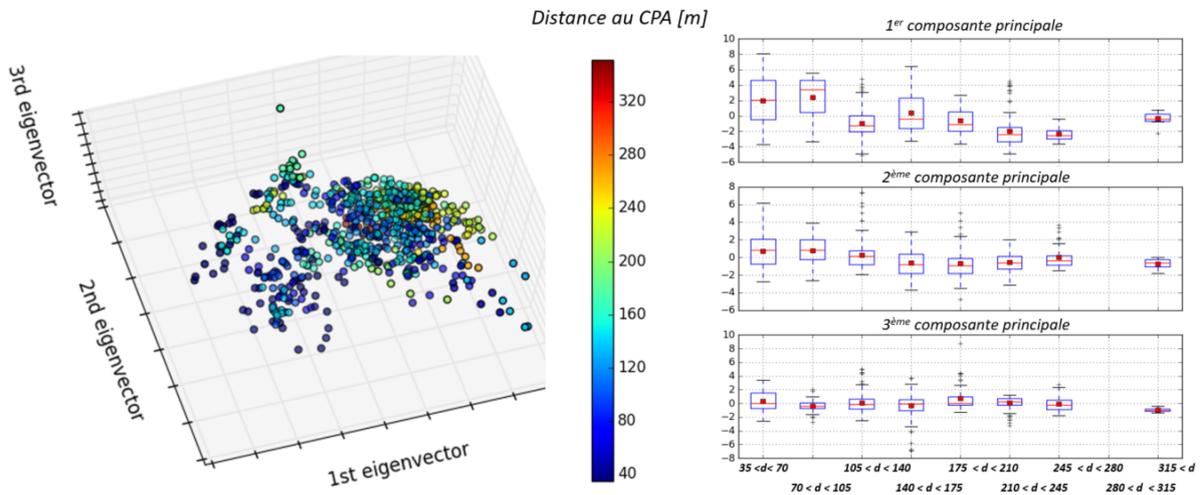
La ramification de l'embranchement correspondant aux grandes embarcations est étudiée dans un premier temps. Lors de la suppression des petites embarcations, le nombre de descripteurs ayant une corrélation supérieure à 0.3 augmente lorsque l'on considère la longueur, les catégories de bateau et la vitesse du bateau mais diminue lorsque l'on considère la distance au CPA (Table 46).

	Longueur	Catégories	Distance au CPA	Vitesse au CPA
Corrélation > 0.4	<u>0 descripteur</u>	<u>10 descripteurs</u> : S19 S36 S40 S41 S61 M1 M5 M6 M60 C29	<u>4 descripteurs</u> : S40 M2 M60 C28	<u>8 descripteurs</u> : S40 S41 M1 M2 M6 M60 C28 C29
0.4 > Corrélation > 0.3	<u>18 descripteurs</u> : T3 T4 S19 S33 S44 S49 S52 S96 S97 S98 H7 H48 D2 D22 M6 C12 C29 L1	<u>19 descripteurs</u> : S25 S39 S55 S57 S58 S59 S60 S96 H12 H62 D4 D6 D7 D16 M4 M52 M61 C12 C16 C29	<u>17 descripteurs</u> : T5 S36 S39 S41 S55 S59 S60 D8 D14 M1 M4 M6 C4 C29 C32 L6 L7	<u>23 descripteurs</u> : T5 S19 S30 S36 S55 S59 S60 H3 H60 H62 D6 D7 D16 M4 M5 M9 M13 M16 M34 M51 M53 C4 C12 C28 C29

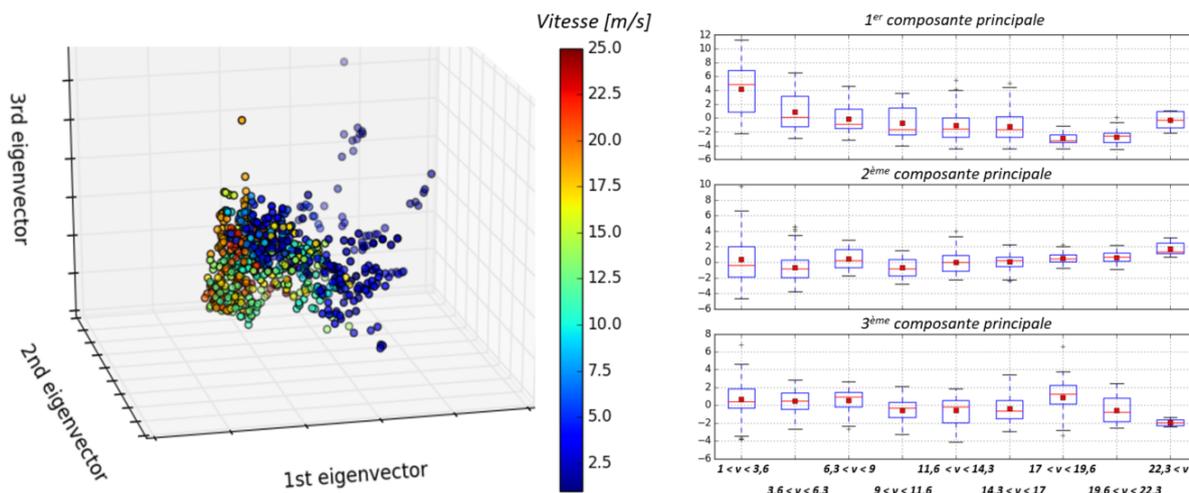
Table 46 : Liste des descripteurs acoustiques les plus pertinents pour le choix du second étage

L'analyse de trois composantes principales de l'ACP réalisée pour les paramètres de plus forte corrélation (supérieur à 0.3) montre une bonne séparation en fonction de la longueur de l'embarcation (Figure 98) : les bateaux de longueurs supérieures à 16 m sont présents dans la branche droite alors que les bateaux de longueur inférieure à 16 m sont présents dans la branche gauche. Une partie commune réside à l'intersection de ces branches où figurent les embarcations de plus de 32 m. La séparation est moins prononcée pour les paramètres vitesses ou catégories de bateaux : en considérant une vitesse limite de 5.5 m/s, deux nuages de points apparaissent, mais présentent une forte partie commune. De même, l'analyse par catégorie présente des nuages de points de forte proximité. La distance au CPA est un paramètre moins discriminant : un nuage de points homogène apparaît avec un regroupement des bateaux les plus proches à une des extrémités du nuage de points. Le paramètre le plus déterminant pour le second étage des classifications des petites embarcations est la **longueur du bateau. 2 catégories sont considérées : plus ou moins 16 m de long.**

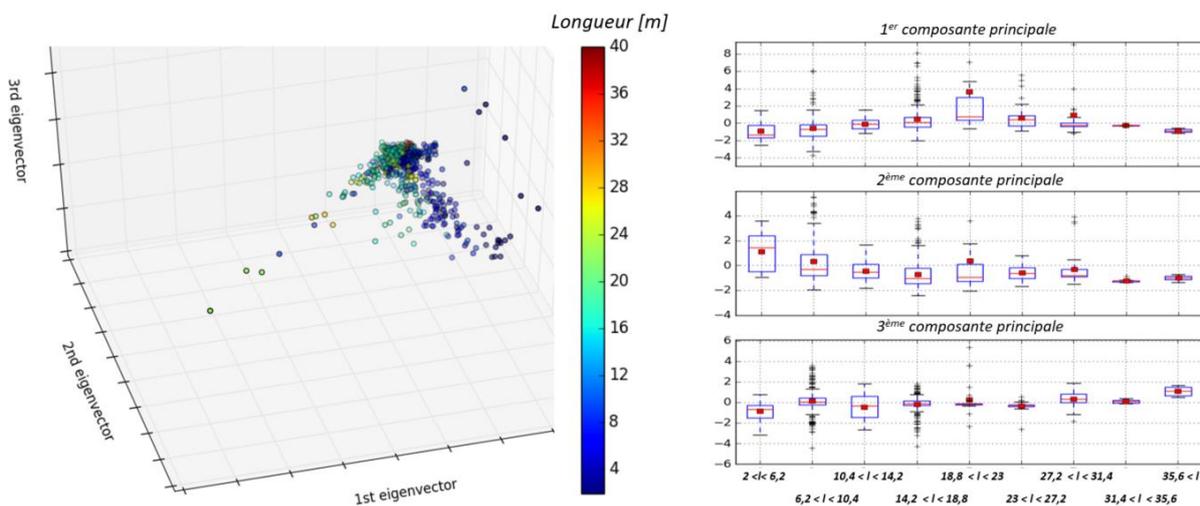
Distance au CPA du bateau (60.1 % de la variance observée)



Vitesse au CPA du bateau 50.36 % de la variance observée



Longueur du bateau 62.5 % de la variance observée :



Catégorie de bateau : 56.19 % de la variance observée

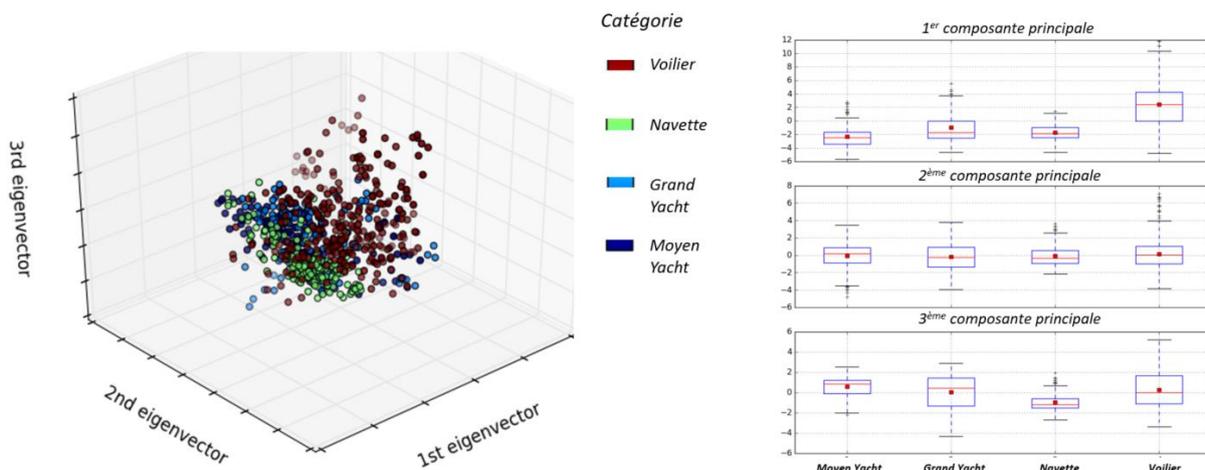


Figure 98 : ACP lors du choix du deuxième étage de classification en considérant les descripteurs ayant une corrélation > 0.3

La Table 47 présente les informations relatives à la corrélation entre les descripteurs acoustiques et les paramètres descripteurs pour les deux sous-ensembles de grandes embarcations.

	Embarcation de moins de 16 m		Embarcation de plus de 16 m		
	Distance	Vitesse	Catégories	Distance	Vitesse
corrélation > 0.4	24 descripteurs : S4 S15 S25 S29 S36 S40 S41 S55 S57 S59 S60 H63 D14 M1 M2 M21 M60 M61 C2 C4 C28 L5 L6 L7	23 descripteurs : S5 S25 S29 S30 S31 S36 S40 S41 S42 D6 D7 D11 D13 D14 D16 D20 D21 M1 M9 M13 M60 M61 C29	0 descripteur	5 descripteurs : T3 D2 C28 L0 L1	22 descripteurs : S63 S74 S81 H3 M2 M5 M25 M30 M34 M35 M37 M51 M53 M55 C4 C28 C30 C31 C32 C33 C34 C35
0.4 > corrélation > 0.3	38 descripteurs : T3 S5 S8 S14 S16 S30 S34 S35 S39 S47 S48 S49 S53 S58 S61 S83 S87 S94 H62 H65 H66 D2 D5 D8 D22 M24 M37 C15 C29 C39 L1 L3 L4 L18 L22 W0 W4 W9 W11 W31 W33	30 descripteurs : T5 S4 S15 S16 S58 S61 S87 S88 S89 S94 S96 S98 H2 H62 D3 D5 D12 D17 D18 D19 M52 M77 C2 C12 C22 L3 L5 L6 L7 W9	3 descripteurs : M20 M47 M69	37 descripteurs : T0 T5 T8 S0 S11 S14 S33 S40 S42 S44 S47 S48 S49 S52 S53 S63 S67 D5 D8 D10 D12 D14 M0 M2 M35 M74 C13 C32 L4 L6 L7 L18 W0 W9 W11 W31 W32	27 descripteurs : T5 S26 S37 S40 S67 H1 H50 D8 D10 D12 D23 M7 M20 M29 M32 M36 M52 M60 M61 C0 C1 C8 C13 C36 C38 L6 W4

Table 47 : Corrélation liée au choix du troisième étage de classification

Pour les grandes embarcations de plus de 16 m, l’affichage par catégorie des trois composantes principales de l’ACP réalisée en considérant les descripteurs de plus forte corrélation présente trois nuages de points avec un fort recouvrement. Dans le cas de la distance au CPA, une séparation du nuage de points séparation entre les bateaux à plus ou moins 150 m est identifiable mais possède un fort recouvrement. Cette distinction est plus marquée dans le cas de l’affichage en fonction de la **vitesse au CPA du bateau** ou deux nuages de points semblent pouvoir être isolée correspondant à une limite de vitesse entre 6 m/s et 9.2 m/s et fixée pour la suite à **7.5 m/s**.

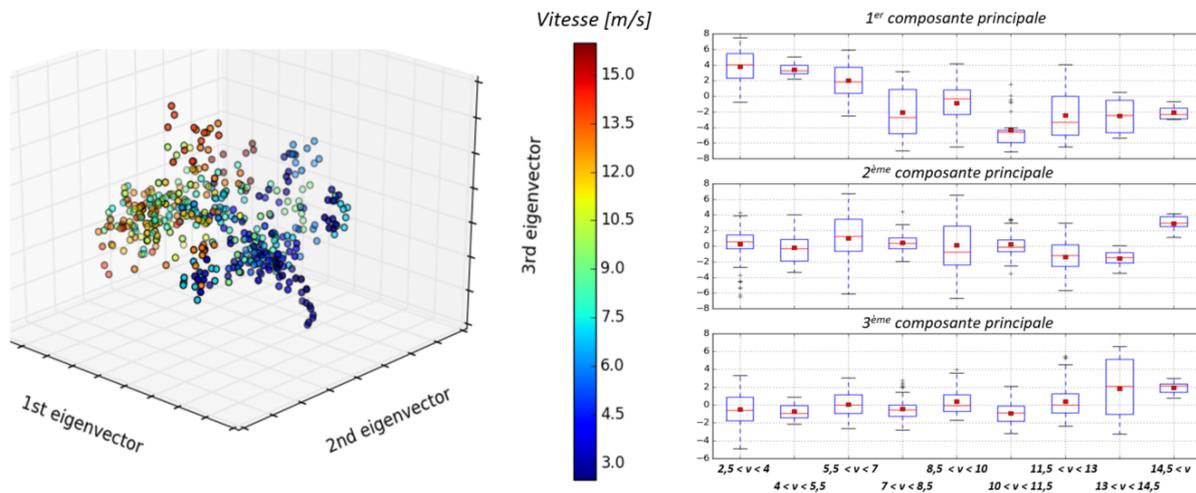
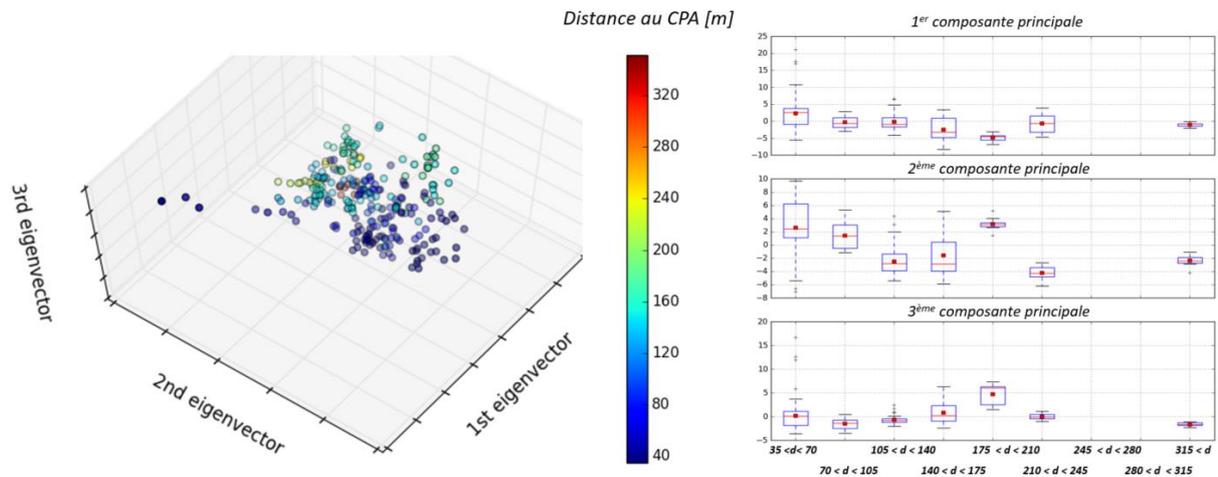


Figure 99 : ACP pour le choix du troisième étage de classification en fonction de la vitesse du bateau (48.88 % de la variance observée)

Pour les grandes embarcations de moins de 16 m, l’affichage des trois premières composantes principales de l’ACP montre une différenciation possible entre les bateaux pour les deux paramètres. Cette séparation s’effectue à une distance de plus ou moins **120 m** ou à une vitesse de plus ou moins 4 m/s. Une meilleure séparabilité est observée pour le critère **distance au CPA**.

Distance au CPA du bateau 52.77 % de la variance observée :



Vitesse au CPA du bateau 55.33 % de la variance observée :

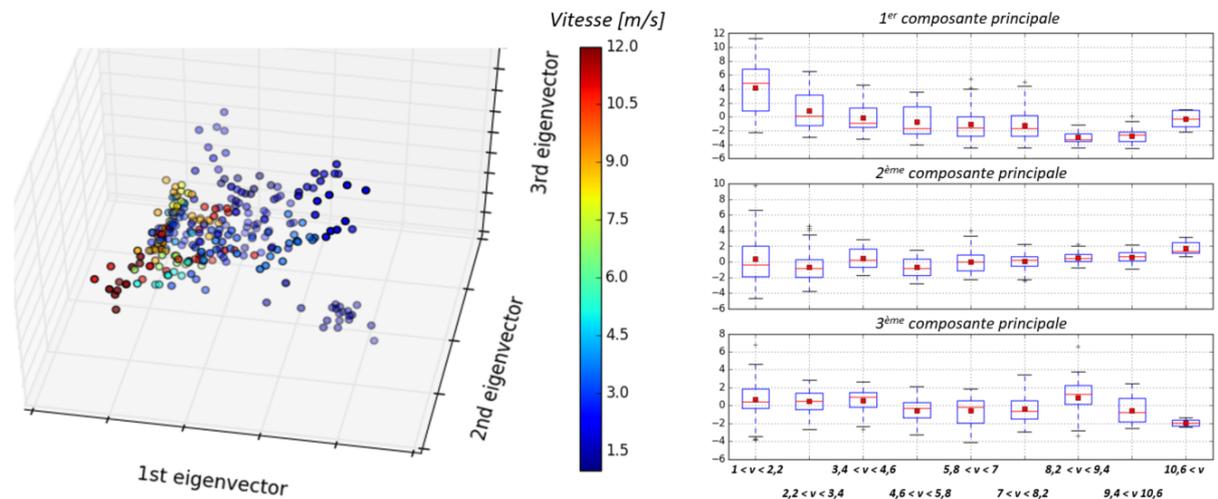


Figure 100 : ACP pour le choix du troisième étage de classification des grandes embarcations de moins de 16 m

L'analyse des trois premières composantes principales de l'ACP montre la possibilité d'identifier des nuages de points avec un recouvrement pour les 4 sous-ensembles. Une forte différenciation est à noter pour les bateaux proches de moins de 16 m en fonction de la vitesse une vitesse (limite à 2 m/s). Toutefois cette identification ne semble pas présenter d'intérêt pour la classification et relève de l'individualité des bateaux. **La classification se termine au troisième étage pour les grandes embarcations.**

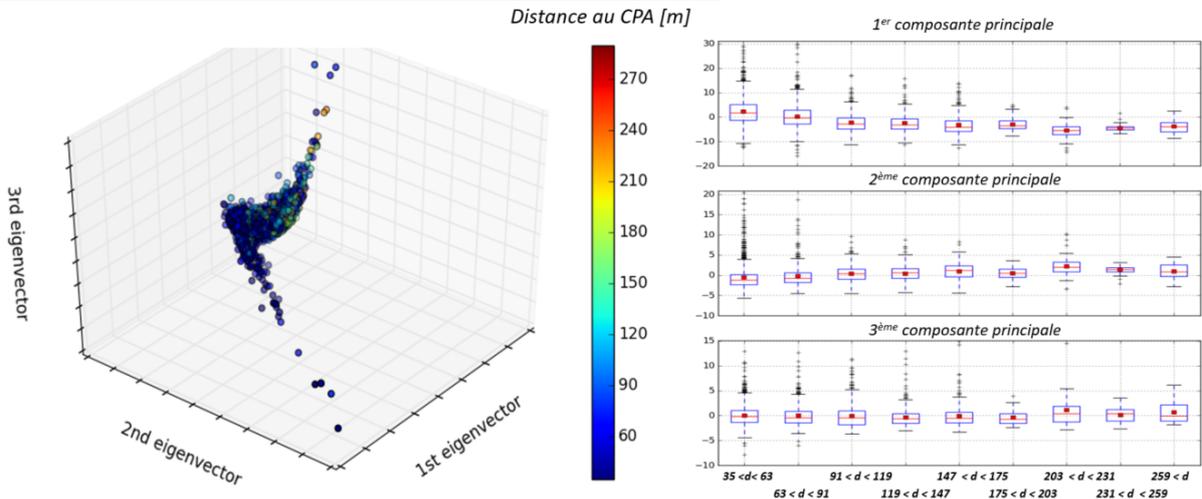
La suite de cette section est consacrée à la **ramification de l'embranchement des petites embarcations**. La corrélation entre les descripteurs acoustiques et les deux paramètres de distance et de vitesse du bateau au CPA est renforcée après suppression des grandes embarcations. Les coefficients de corrélation entre les descripteurs acoustiques et les autres paramètres descripteurs du bateau restent faibles (Table 48).

	Longueur	Catégories	Distance au CPA	Vitesse au CPA	Type moteur
C > 0.4	0 descripteur	0 descripteur	23 descripteurs	7 descripteurs	0 descripteur
0.4 > C > 0.3			75 descripteurs	48 descripteurs	
c limite ACP	0.15	0.24	0.3	0.3	0.24
Descripteurs pour ACP	4	5	T3 T8 T9 T10 S0 S3 S4 S5 S9 S11 S12	S0 S3 S4 S5 S6 S11 S13 S14	6
	descripteurs : M41 M47 M63 M69	descripteurs : S57 S62 M23 M61 C11	S13 S14 S15 S16 S17 S18 S19 S20 S22 S26 S31 S33 S37 S38 S42 S44 S47 S48 S49 S52 S53 S54 H7 H9 H18 H20 H23 H25 H29 H31 H40 H41 H42 H47 H48 H49 D2 D5 D14 M40 M62 C0 C33 L0 L1 L4 L5 L6 L7 L12 L13 L14 L15 L17 L19 L20 W0 W1 W3 W4 W5 W12 W32 W33	S16 S17 S18 S19 S22 S33 S44 S47 S48 S49 S52 S54 H9 H13 H18 H20 H23 H25 H49 H64 H65 D2 D5 D14 C0 L4 L5 L6 L7 L12 L14 L15 L17 L20 W0 W3 W4 W5 W7 W8	descripteurs : S62 M23 C3 C9 C11 C29

Table 48 : Corrélation pour le choix du second étage pour les petites embarcations

Comme précédemment, une ACP est réalisée en considérant les paramètres de plus forte corrélation. Ces analyses présentes des conclusions similaires à l'étude menée sur l'ensemble des embarcations. Un nuage de points homogène est observé **sans forte séparabilité** entre les sous-ensembles de paramètres. Aucun élément différenciant en fonction de la longueur ou des catégories de bateau n'apparaît. En ce qui concerne le type de moteurs et la distance au CPA, les éléments les plus éloignés du barycentre correspondent aux bateaux équipés de moteur hors-bord, dans le premier cas, ou aux bateaux les plus distances dans le second cas. Des particularités plus marquées apparaissent dans le cas de l'étude en fonction de la vitesse au CPA : au-dessus d'une vitesse de 12 m/s, les éléments sont localisés dans la partie montante (Figure 101). L'étude de la vitesse laisse envisager une plus forte séparabilité des sous-ensembles. Cet étage de classification est alors divisé en **3 classes : les bateaux de vitesses inférieures à 7 m/s, les bateaux de vitesses comprises entre 7 et 12 m/s et les bateaux de vitesses supérieures à 12 m/s.**

Distance au CPA du bateau 60.85 % de la variance observée :



Vitesse au CPA du bateau 68.15 % de la variance observée :

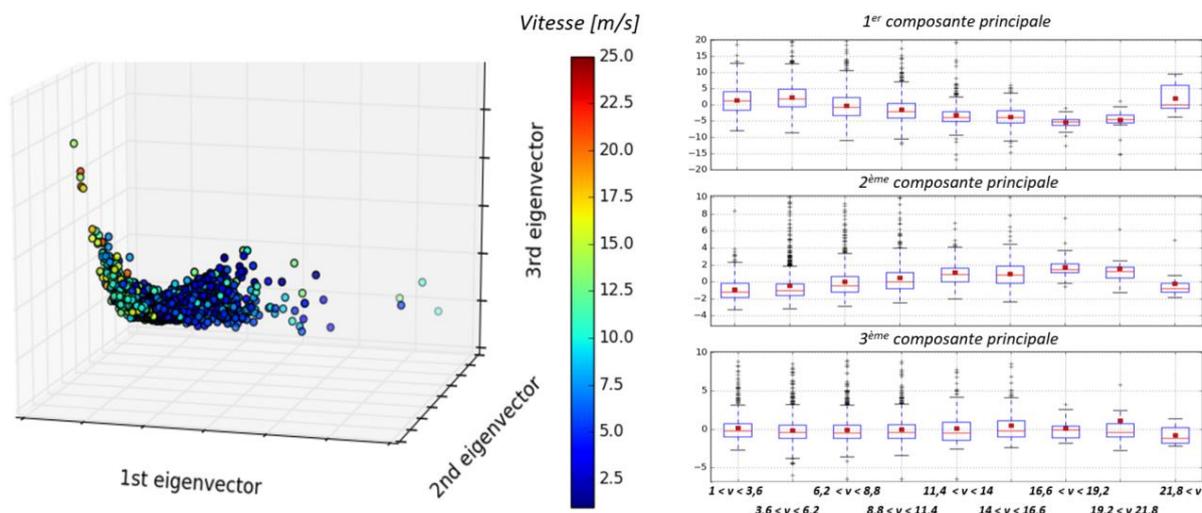


Figure 101 : ACP pour le choix du deuxième étage de classification des petites embarcations

La Table 49 synthétise les informations concernant la détermination du troisième étage de classification.

		Corrélation > 0.4	0.4 > corrélation > 0.3	Limite de corrélation pour ACP	Observation ACP
LENT : Vitesse < 7 m/s	Longueur	0 descripteur	0 descripteur	0.18	Non pertinent
	Catégorie	0 descripteur	5 descripteurs	0.3	<i>Différenciation possible entre des sous-ensembles</i>
	Distance	0 descripteur	35 descripteurs	0.3	Plus le bateau est loin, plus le point est proche du barycentre
MODEREE : 7 m/s < Vitesse < 13 m/s	Type moteur	0 descripteur	4 descripteurs	0.3	Non pertinent
	Longueur	0 descripteur	0 descripteur	0.15	Non pertinent
	Catégorie	0 descripteur	0 descripteur	0.25	Non pertinent
RAPIDE : Vitesse < 13 m/s	Distance	8 descripteurs	44 descripteurs	0.3	Plus le bateau est loin, plus le point est proche du barycentre
	Type moteur	0 descripteur	0 descripteur	0.25	Moteur in-bord plus proche du barycentre
	Longueur	5 descripteurs	9 descripteurs	0.3	<i>2 nuages de points séparés mais ayant un fort recouvrement</i>
	Catégorie	0 descripteur	11 descripteurs	0.3	Non pertinent
	Distance	0 descripteur	2 descripteurs	0.28	Non pertinent
	Type moteur	2 descripteurs	20 descripteurs	0.3	Non pertinent

Table 49 : Synthèse sur le choix du troisième étage pour les petites embarcations

Pour les embarcations lentes (vitesse inférieure à 7 m/s), aucun élément ne permet une différenciation franche entre les sous-ensembles. La visualisation en fonction des catégories permet de diviser en deux sous-ensembles les catégories de bateaux avec d'un côté les vedettes et pêches promenade, et de l'autre côté l'ensemble des autres embarcations. La Figure 102 représente les résultats obtenus par l'ACP en fonction des catégories de bateaux et en utilisant les descripteurs acoustiques : M61 C3 C9 C11 C27. Sur cette figure, seul le premier sous-ensemble (vedettes et pêches promenade) possède des éléments sur le nuage de points secondaire oblique mais de manière non exclusive. Dans le cas de la distance au CPA, les bateaux proches recouvrent l'ensemble du nuage de points alors que les bateaux le plus éloignés convergent vers le barycentre du nuage.

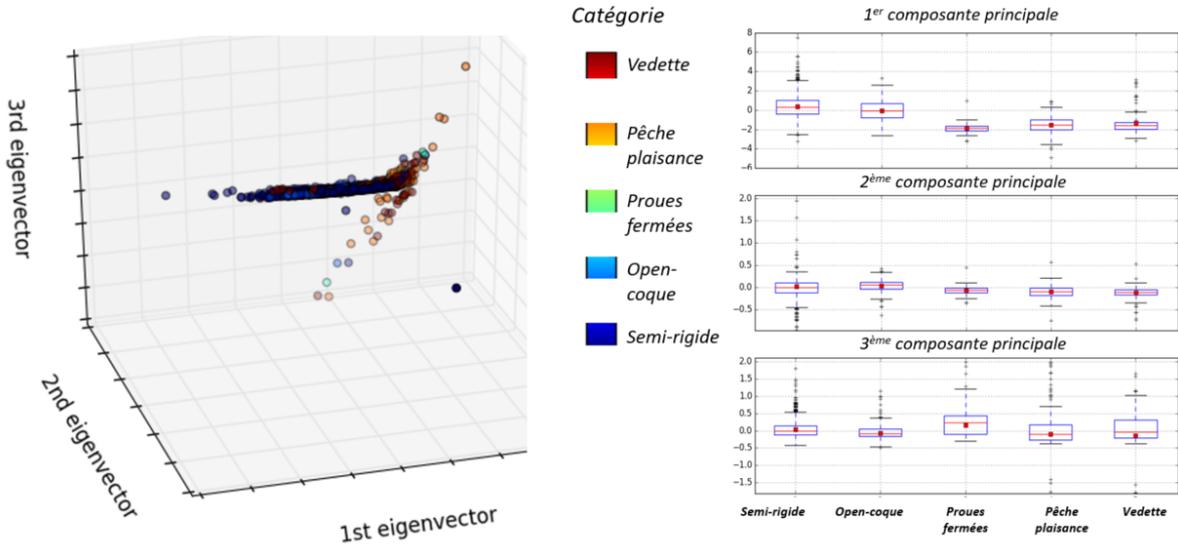


Figure 102 : ACP pour le choix du troisième étage de classification en fonction de la catégorie de bateau – sélection réalisée en considérant la corrélation (73.20 % de la variance observée)

En l'absence de résultat concluant, une alternative est proposée en sélectionnant les descripteurs en utilisant la sélection des descripteurs acoustiques par sélection en considérant le critère sur boxplot en adéquation avec les catégories de bateaux est réalisé pour cet embranchement. 151 descripteurs acoustiques répondent aux exigences du critère (<0.05). La visualisation des trois composantes de l'ACP ne permet toutefois pas d'isoler des classes. **Au regard des résultats, il est préférable de ne pas ramifier d'avantage cette classe.**

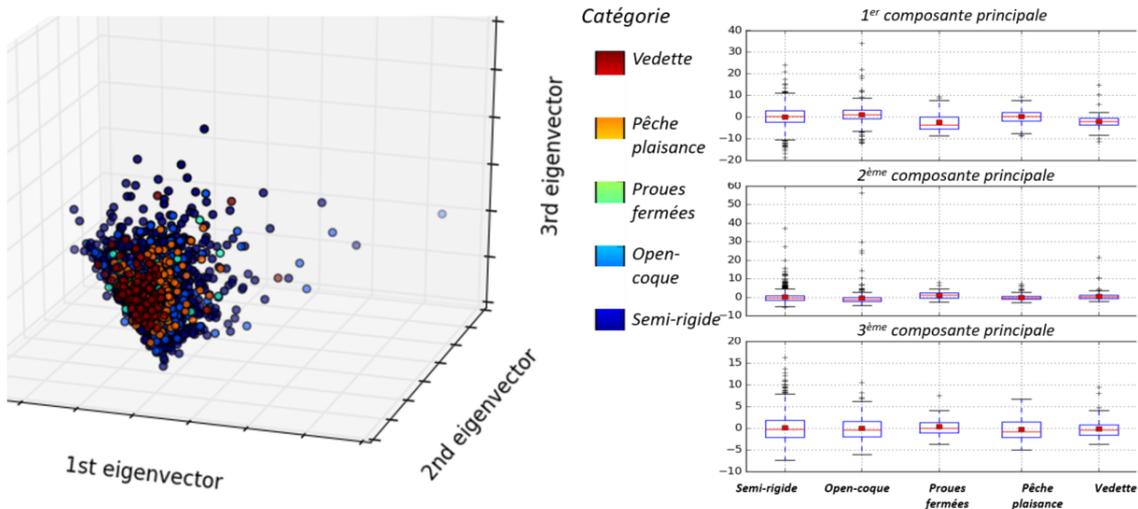


Figure 103 : ACP pour le choix du troisième étage de classification en fonction de la catégorie de bateau – sélection réalisée en considérant le critère sur box plot (73.20 % de la variance observée)

La visualisation des résultats de l'ACP ne permet pas de franche distinction entre des sous-ensembles liés aux paramètres en considérant la sélection par corrélation et la sélection des catégories par le critère sur box plot utilisant. Pour les embarcations à vitesses modérée (vitesses comprises entre 7 m/s et 13 m/s), la **ramification s'arrête alors à ce niveau.**

Pour les embarcations rapides (plus de 13 m/s), la visualisation en fonction de la longueur permet d'identifier deux groupes d'individus, avec cependant un fort recouvrement : les bateaux les plus petits sont localisés sur la partie gauche et les bateaux les plus longs sont localisés sur la partie droite. La

Figure 104 représente les résultats obtenus par l'ACP en fonction de la longueur du bateau et en utilisant les 9 descripteurs acoustiques : *S8 S30 M11 M12 M41 M48 M63 M70 L15*. Cet ensemble est donc divisé en deux parties : **les bateaux de moins de 7 m et les bateaux de plus de 7 m de longueur**. Au vu des résultats non pertinents pour les autres paramètres, la classification n'est pas poursuivie jusqu'au quatrième étage.

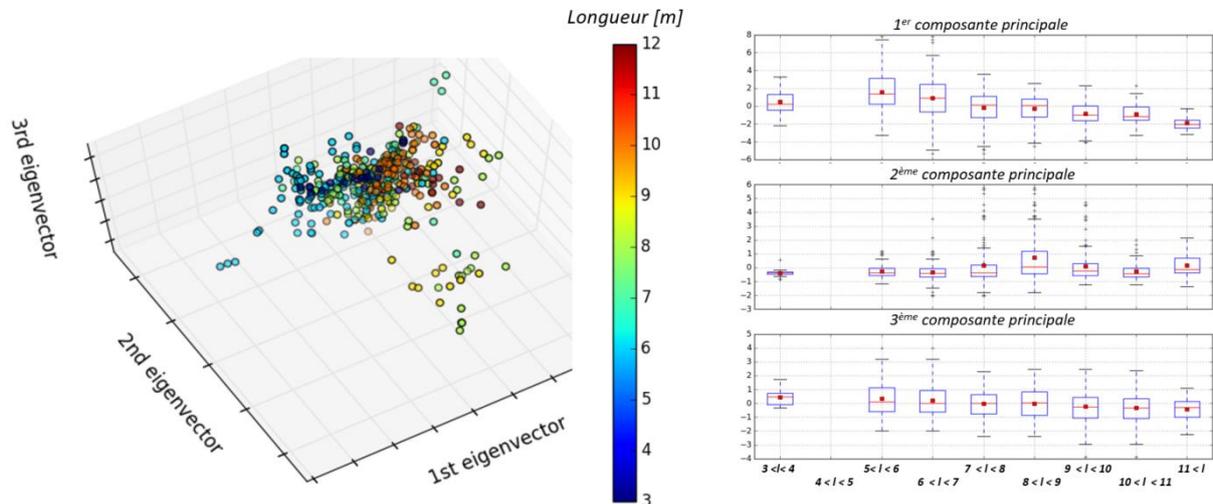


Figure 104 : ACP pour le choix du troisième étage de classification en fonction de la longueur du bateau (70.13 % de la variance observée)

La Figure 105 présente l'**arborescence finale de classification** construite à partir de l'existence de paramètres acoustiques présentant une dépendance aux classes de bateaux et utilisée pour le chapitre suivant, ainsi que le nombre de bateaux présent par catégorie.

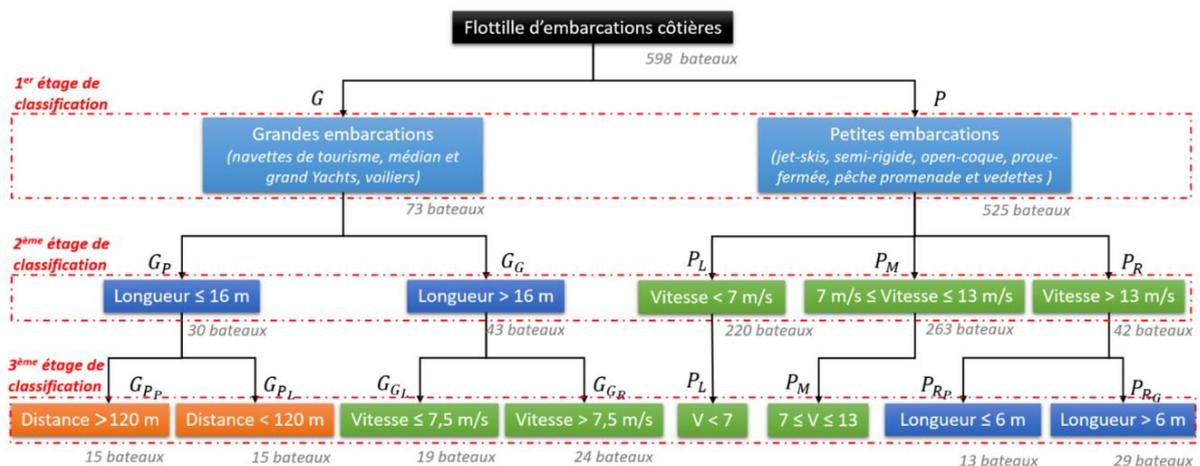


Figure 105 : Arborescence de classifications acoustiques des embarcations de la flottille côtière

La Table 50 présente pour chaque embranchement de l'arborescence de classification le pourcentage de couple de descripteurs acoustiques présentant une redondance et le pourcentage de descripteurs les moins robustes aux effets de propagation. Ces deux pourcentages restent faibles pour les différents embranchements (inférieur à 6%). Une exception est à noter concernant l'embranchement des grandes embarcations de plus de 16 m de longueur en fonction de la vitesse : 7.5 % des descripteurs compte parmi les descripteurs les moins robustes aux effets de propagation. La valeur médiane du critère est de 0.33 pour les 4 descripteurs concernés.

Etage de classification	Embranchement	Nombre de descripteurs acoustiques	Pourcentage de couple de descripteurs redondants	Pourcentage de descripteurs moins robustes aux effets de la propagation
Etage 2	Grande embarcation en fonction de la longueur	18	1.3 %	0 %
	Petite embarcation en fonction de la vitesse	48	2.4 %	0 %
Etage 3	Grande embarcation (< de 16 m) en fonction de la distance	65	0.91 %	1 %
	Grande embarcation (> de 16 m) en fonction de la vitesse	53	0.36 %	7.5 %
	Petite embarcation rapide en fonction de la longueur	9	5.5 %	0 %

Table 50 : Pourcentage de descripteurs acoustiques présentant une redondance et étant les moins robustes à la propagation lors de la sélection de chaque embranchement de l'arborescence de classification

7.4 Discussion

7.4.1 Un arbre de classification présentant de fortes inhomogénéités en termes de nombre d'individus par classe et indépendante de la catégorie du bateau

L'arborescence de classification finale exploite principalement les informations concernant la longueur et la vitesse du bateau. Ces deux paramètres sont les plus utilisés dans la littérature lors de la classification des grandes embarcations [Ross_1976, Allen_2012, McKenna_2011]. En revanche, bien que présent chez [Allen_2012, Simard_2016a], l'aspect catégorie de bateau n'est pas conservée par ce protocole. Pour les grandes embarcations, le critère de taille permet un regroupement des individus se reprochant des catégories de bateaux. Ainsi, il est possible de se demander si le rejet du paramètre catégorie de bateau est lié à la diversité présente chez les petites embarcations ou à la méthode de classification. En effet, la classification est basée sur une corrélation entre descripteurs acoustiques et paramètres du bateau. Cette méthode est adaptée pour sélectionner les descripteurs acoustiques avec la longueur et la vitesse du bateau mais est moins judicieuse lors d'une classification par catégorie. La piste liée à la méthode de classification est écartée en raison des résultats observés lors de l'utilisation du critère basé sur l'analyse des boxplot pour la classification des petites embarcations de vitesse lente et modérée. Ce critère ne permet pas non plus d'obtenir des résultats concluants pour ces deux embranchements. La non adéquation avec le paramètre catégorie de bateau chez les petites embarcations semble induit par la diversité intra-catégorie. Cette forte diversité présente chez les petites embarcations se répercute lors de la création de l'arborescence de classification. Ces deux classes représentent 80.7 % de la base de données. Ainsi, une forte hétérogénéité dans le nombre d'éléments par classe est observée.

7.4.2 Redondance et robustesse des descripteurs lors de la création de l'arborescence de classification

Lors de la création de l'arborescence de classification, les aspects de redondance et de robustesse aux effets de propagation des descripteurs acoustiques ne sont directement intégrés dans le protocole de classification.

Les descripteurs acoustiques étant sélectionnés en utilisant la corrélation avec un paramètre décrivant le bateau, la sélection de descripteurs redondants ne peut être évitée par ce protocole. Dans la littérature, les méthodes de sélection d'attributs qualifiée de « *sélection de descripteurs pertinents* » ne cherchent pas à supprimer toute redondance parmi les attributs : une redondance maîtrisée permet aussi de souligner une information. Ainsi, [Guyon_2003] montre que la présence de variables redondantes pertinentes ne fait que consolider la séparabilité des classes. Dans le cas présent, le

nombre de couples de descripteurs fortement corrélés est faible : inférieur à 6 %. La suppression de ces paramètres ne présente pas un enjeu majeur. Cependant, une adaptation du protocole de classification visant à conserver le descripteur acoustique présentant le maximum de corrélation, lorsque celle-ci est conséquente (>0.9), peut être envisagée afin de supprimer l'aspect redondance de descripteurs acoustiques.

En ce qui concerne la robustesse des descripteurs acoustiques aux effets de propagation, l'idée portée lors de la conception du protocole de classification est qu'un descripteur acoustique moins robuste à la propagation présente de fortes oscillations pour un même paramètre descriptif. Par conséquent, il a été attendu que ces fortes oscillations diminuent d'un point de vue global la corrélation entre les descripteurs acoustiques et le paramètre du bateau, participant ainsi à la non sélection du descripteur acoustique. La Table 50 confirme cette observation : moins de 1 % des descripteurs acoustiques compte parmi les descripteurs acoustiques les moins robustes aux effets de propagation pour 4 des 5 embranchements de classification. Par ailleurs, il est possible de se demander si un paramètre évoluant en fonction du temps doit forcément être supprimé au préalable ? Dans le cas présent, l'étude est réalisée en considérant chaque segment de 10 secondes indépendamment. Pour cette application, l'évolution des descripteurs en fonction des effets de propagation est gênante. Cependant pour une application de classification avec un suivi temporel, les variations d'un descripteur acoustique, si elles sont spécifiques à une classe de bateaux peuvent devenir des éléments discriminants. Ce point n'a pas pu être abordé au cours de cette thèse.

7.4.3 De potentiels indicateurs acoustiques pour le suivi environnemental

Le chapitre 4 montre le lien entre le niveau SPL et le logarithme en base dix de la distance du bateau de plus proche. Ce lien évolue en fonction de la fréquence et atteint des valeurs de corrélation supérieures à 0.4 entre les bandes de tiers d'octave de 200 Hz à 4 kHz. Ces niveaux acoustiques ont été estimés en considérant la même durée d'écoute que les descripteurs acoustiques présentés dans ce chapitre. 15 descripteurs acoustiques présentent une forte correspondance, corrélation supérieure à 0.4, avec la distance au CPA du bateau :

- T8 : la déviation standard de l'enveloppe temporelle du signal,
- S0 : la déviation standard du spectre dans la bande 0Hz-10 kHz,
- S3 : le kurtosis du spectre dans la bande 0Hz-10 kHz,
- S5 : la flatnesse du spectre dans la bande 0Hz-10 kHz,
- S14 : le centroïde de l'enveloppe spectrale dans la bande 0Hz-10 kHz,
- S16 : la flatnesse de l'enveloppe spectrale dans la bande 0Hz-10 kHz,
- S22 : la déviation standard du spectre dans la bande 0Hz-2 kHz,
- S33 : la déviation standard de l'enveloppe du spectre dans la bande 0Hz-2 kHz,
- D2 : la déviation standard de l'enveloppe temporelle du signal DEMON,
- C0 : la déviation standard du cepstre,
- L0 : le peak power,
- L4 : la mean Frequency,
- L6 : le skewness fréquentiel,
- L7 : le kurtosis fréquentiel,
- W0 : la déviation standard de la carte d'énergie estimée par paquet d'ondelette.

Ainsi, il est possible de se demander quelle serait la pertinence de ces 15 descripteurs acoustiques lors d'un suivi acoustique de la contribution anthropophonique des zones côtières. Une étude spatio-temporelle de ces descripteurs est à réaliser pour répondre à cette question et estimer l'impact de la biophonie sur l'évolution de ces descripteurs.

7.5 Conclusion

La caractérisation acoustique des bateaux est réalisée par l'estimation de 383 descripteurs acoustiques. Ces descripteurs acoustiques sont regroupés en 8 catégories basées sur des méthodes d'analyses différentes : l'analyse temporelle, spectrale, de la distribution d'harmoniques, demon, des coefficients MFCC, du cepstre, du spectrogramme et de la distribution par paquet d'ondelette. La distribution d'harmoniques est obtenue par un algorithme spécifiquement développé pour cette thèse et visant à détecter automatiquement la fréquence fondamentale par corrélation avec un banc de peigne de raies. Pour chaque catégorie, un ensemble de paramètres caractérisant la distribution est estimé. Dans certains cas, une modélisation paramétrique est réalisée. Des descripteurs spécifiques visant à exploiter les éléments discriminants observés dans le chapitre précédent sont définis : caractérisation de la bosse de bruit spectrale, de l'amortissement du cepstre et de la répartition des raies spectrales et présente dans l'analyse demon. Un algorithme spécifique est mis en place pour détecter les ruptures spectrales présentes dans ce cepstre.

Cet ensemble de descripteurs présente une redondance : 138 couples de descripteurs ont une corrélation supérieure à 0.9, principalement pour le domaine spectral et de la distribution par harmonique. L'analyse par composante principale permet une visualisation de l'ensemble des paramètres dans un espace de dimensions réduit. Que ce soit pour l'analyse de l'ensemble des descripteurs ou des sous-ensembles correspondant aux huit méthodes d'analyses, les résultats sont semblables. Un nuage de points homogène est alors observé sans forte distinction entre des catégories de bateaux. Des éléments notables sont toutefois observés : les bateaux équipés de moteur hors-bord sont représentés dans la direction la moins dense du nuage de points et sont plus éloignés du barycentre du nuage. Un regroupement des bateaux de plus forte longueur, les plus distants ou les plus rapides est observé. Les plus forts liens entre les descripteurs acoustiques et les paramètres descriptifs du bateau sont observés lors de la comparaison avec la distance au CPA, puis avec la vitesse du bateau.

L'arborescence de classification de la flottille d'embarcation côtière est présentée. Cette arborescence est composée de trois étages de classification. Excepté pour le premier étage, le choix effectué pour chaque embranchement est issu de la visualisation des trois composantes principales de l'ACP d'un sous ensemble de descripteurs acoustiques. Ce sous-ensemble correspond aux descripteurs acoustiques présentant la plus forte corrélation avec le paramètre descriptif du bateau. Le premier étage permet de séparer les petites embarcations des grandes embarcations. Le second étage de classification permet de différencier les petites embarcations en fonction de leurs vitesses et les grandes embarcations en fonction de leur taille. Le dernier étage de classification permet de différencier les petites embarcations rapides en fonction de leurs tailles, les plus grandes embarcations en fonction de leur vitesse et les grandes embarcations de plus petites tailles en fonction de leurs proximités au CPA.

L'arbre de classification finale fait abstraction de la notion de catégories de bateaux. Une forte hétérogénéité dans le nombre d'éléments par classe est observée. Ce chapitre met en lumière une série de 15 descripteurs acoustiques fortement liés à la distance au CPA du bateau et pouvant être des pistes intéressantes pour le suivi anthropique en zone côtière.

8 Chapitre 8 : Détection et classification automatiques de bateaux

8	Chapitre 8 : Détection et classification automatiques de bateaux	185
8.1	Introduction.....	186
8.2	L'apprentissage supervisé : l'Etat de l'art.....	187
8.3	Présentation des méthodes : classifieur, base d'apprentissage et sélection d'attributs....	190
8.3.1	Présentation de la base de données	190
8.3.2	Choix du classifieur et influence des paramètres.....	191
8.3.3	Choix de la base d'apprentissage	192
8.3.4	Schéma global de la classification	192
8.3.5	La sélection de descripteurs.....	193
8.4	La détection et la classification acoustique des bateaux par apprentissage supervisée	195
8.4.1	La classification acoustique des bateaux.....	195
8.4.2	La détection acoustique de bateaux	209
8.4.3	La détection acoustique des bateaux au loin parmi la catégorie <i>absence de bateau</i> . 210	
8.5	Discussion	212
8.5.1	Une difficulté de classification induite par les deux classes nombreuses.....	212
8.5.2	Performance de l'algorithme	212
8.5.3	Adaptation pour un auto-apprentissage	212
8.5.4	Adaptation pour des systèmes embarqués.....	212
8.5.5	La possibilité de classer les bruits biologiques	212
8.6	Conclusion	213

8.1 Introduction

L'utilisation d'algorithmes permettant une classification automatique basée sur une phase d'entraînement est couramment présente dans la littérature. Pouvant entre autres augmenter l'espace de représentation, réaliser des sélections, des comparaisons et des combinaisons linéaires de descripteurs, différentes stratégies sont mises en place par les algorithmes de classification supervisée et présentent des perspectives intéressantes.

Le chapitre précédant a défini une liste de 383 descripteurs acoustiques. La visualisation par ACP de l'ensemble de ces descripteurs ne permet pas d'observer une forte séparation entre les classes de bateaux. En revanche, les distinctions entre les embranchements sont observables lors de la sélection d'un sous-ensemble de descripteurs. Ces résultats nous interpellent sur les questions suivantes :

- *Quelles seraient les performances d'un algorithme de classification supervisée en considérant l'ensemble des descripteurs acoustiques ?*
- *Quel sous-ensemble optimal de descripteurs permet d'obtenir la meilleure classification ?*
- *Quelles sont les performances de ces descripteurs à différencier les bateaux des autres sources sonores ?*

Par ailleurs, ces paramètres sont estimés sur huit méthodes d'analyse différentes. Dans un objectif d'implémentation dans des systèmes embarqués, la ressource de calcul est limitée. Ainsi, il est possible de se demander :

- *Quelles seraient les performances de calcul en considérant qu'une seule méthode d'analyse ?*
- *Quel est le sous-ensemble efficace permettant la meilleure classification ?*

Ce chapitre est composé de cinq sections. La première section dresse un état de l'art sur les différentes méthodes d'apprentissage présentes dans la littérature et plus particulièrement sur les algorithmes d'apprentissage supervisés issus du *machine-learning*.

La seconde section présente les méthodes de classification utilisées. Trois algorithmes de *machine-learning* sont retenus. Au regard des disparités présentes dans l'arborescence de classification des bateaux, la méthode de sélection de la base d'apprentissage pour la partie classification est présentée. Deux méthodes de sélection manuelle et automatique d'attributs sont détaillées.

La troisième section est alors consacrée aux résultats obtenus lors de la classification des bruits rayonnés. Les résultats obtenus pour l'ensemble des descripteurs acoustiques sont présentés, ainsi que ceux obtenus lors de la sélection manuelle et automatique de descripteurs. Les meilleurs résultats correspondent à la combinaison optimale de paramètres. La combinaison efficace est alors obtenue lors de la classification de chaque domaine d'analyse individuellement. Cette classification est réalisée en considérant l'intégralité des descripteurs de chaque méthode d'analyse ou un sous-ensemble obtenu après sélection automatique.

La question de la détection des bateaux est abordée dans la quatrième section. Cette détection est réalisée en considérant l'ensemble des descripteurs acoustiques, ainsi que les sélections optimales et efficaces de descripteurs obtenues lors de la classification.

8.2 L'apprentissage supervisé : l'Etat de l'art

Deux catégories d'algorithmes d'apprentissage statistique apparaissent dans la littérature [Celeux_1989] :

- Les méthodes supervisées, dont le rôle est de prédire un état à partir d'observations antérieures annotées, permettent d'établir un lien entre les données d'entrée et les classes définies par un expert. Ces méthodes nécessitent une phase d'entraînement sur un sous-ensemble annoté des individus représentatifs de l'ensemble de la base de données globale.
- Les méthodes non supervisées, dont le rôle principalement est descriptif, permettent d'isoler l'information utile au sein d'un jeu de données. Aucune phase d'entraînement n'est nécessaire, mais un apriori sur le nombre de classes est demandé.

Ces algorithmes d'apprentissage statistique se fondent alors sur deux principes : l'analyse statistique issue de théorie probabiliste [Saporta_2006] et les algorithmes de *matching learning* [Cornuéjols_2011]. Ces méthodes sont utilisées aussi bien pour les problèmes de régression (variable de sortie continue, quantitative) [Herbrich_2000, Xia_2006], de prédiction [Kramer_2001] que pour les problèmes de classification (variable de sortie discrète, qualitative) [Zaugg_2010, Wang_2014]. Les algorithmes de classification permettent de regrouper un ensemble d'individus en plusieurs classes en se basant sur différents paramètres prédéfinis. Deux types de classes sont identifiés : les classes d'informations, correspondant à des catégories d'intérêts (classes supervisées) et les classes spectrales, correspondant à un regroupement par caractéristiques communes (classes non supervisées). Souhaitant pouvoir identifier par acoustique une classe d'intérêt, correspondant aux bateaux définis par rapport à une connaissance terrain, seuls les algorithmes d'apprentissage de classification supervisés sont considérés dans la suite de ces travaux.

Le problème de classification supervisé est résolu en considérant deux approches : génératives et discriminantes [Kotsiantis_2007]. L'approche générative vise à modéliser la distribution jointe des paramètres en entrées et la classe en sortie. Cette modélisation est qualifiée de générative car elle concerne l'ensemble des paramètres d'entrée, de sorties et les variables non observées. La règle de classification est déduite par application de loi de Bayes [Saporta_2006]. Parmi ces algorithmes de classification par modèles génératifs sont présent l'Analyse Discriminante Linéaire [Izenman_2013], les gaussiens mixtures modèles [Reynolds_2015], les modèles de classification Bayésien [Lourens_1987, Weissenbacher_2007] et les différents modèles graphiques [Barrat_2009].

L'approche discriminative cherche des règles de classification entre entrée en sortie par minimisation d'une fonction de cout de classification. Cette approche est particulièrement efficace lorsque les données ont une distribution inconnue ou difficilement modélisable. Différentes méthodes d'approche discriminative sont présentes dans la littérature. Les quatre méthodes les plus utilisés dans la littérature sont présentées dans la Figure 106 : les k plus proches voisins [Mathieu-Dupas_2010], les arbres de décision [Breiman_1984], les réseaux de neurones [Farrokhrooz_2005_a] et les Support Vecteur Machine [Wang_2014].

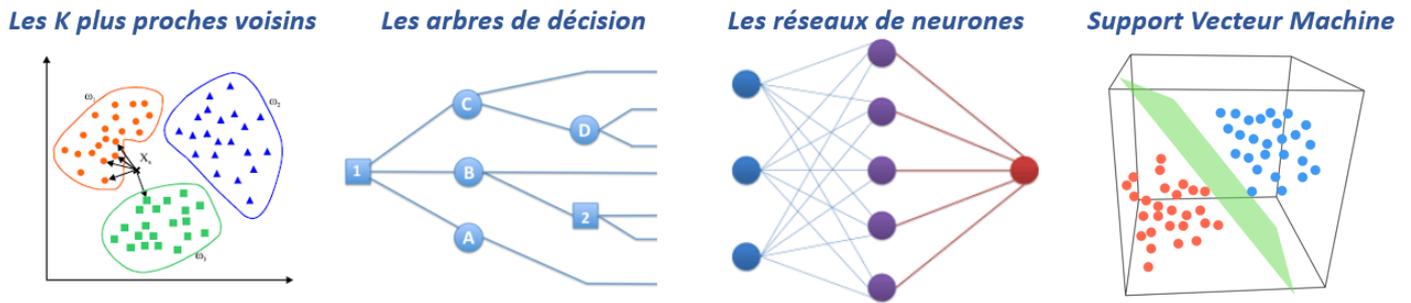


Figure 106 : Présentation de quatre méthodes de classification supervisées discriminantes

Les K plus proches voisins – *k-Nearest Neighbor*. Cette approche non paramétrique figure parmi les plus simples algorithmes d'apprentissage supervisé. Cette méthode de classification consiste à comparer un individu par rapport à ses k voisins les plus proches présents dans la base d'apprentissage. La classe de l'individu correspondant alors à la classe majoritairement représentée parmi ces k plus proches voisins [Mathieu-Dupas_2010].

Les arbres de décision. Cette approche non-paramétrique de classification consiste à créer un arbre inversé par division successive des individus en sous-ensembles. Cette division en deux segments intervient à chaque « nœud » où la valeur d'un paramètre d'entrée est comparée à une valeur seuil. Chaque extrémité de l'arbre, les feuilles, contient alors la décision de classification. La méthode *CART Classification And Regression Tree* [Breiman_1984] est couramment employée. Etant basée sur une stratégie pas à pas hiérarchisée, cette solution ne garantit pas d'obtenir l'optimum global. En réponse à cette recherche d'arbre optimal, l'algorithme « forêt d'arbres décisionnels » (*Random Forest*) [Breiman_2001] effectue un apprentissage sur de multiples arbres de décision entraînés sur des sous-ensembles de données légèrement différentes.

Les réseaux de neurones. Introduit par [McCulloch_1943], cette méthode de classification constitue une régression logistique d'une succession de couches cachées. Le nombre de couches est défini par l'utilisateur. Chaque couche prend son entrée sur les sorties de la couche précédente. Ces couches sont composées d'un nombre différent d'unités appelées *neurones*. Ainsi, la valeur obtenue dans un neurone de la couche N dépend exclusivement des données présentes dans la couche $N-1$. Cette valeur est obtenue par deux types de combinaisons. Les réseaux de type **MLP** (*Multi-Layer Perceptron*) attribuent une fonction de pondération aux valeurs des neurones de la couche $N-1$ et effectuent une combinaison linéaire des valeurs présentes dans chaque neurone. Les réseaux de type **RBF** (*Radial Basis Function*) estiment la distance entre les valeurs des neurones de la couche $N-1$. En fonction de la valeur obtenue après combinaison des éléments de la couche $N-1$, une fonction permet d'activer ou non le neurone, décidant ainsi si ce neurone sera considéré lors de combinaison de la couche suivant $N + 1$. Cette fonction, appelée fonction d'activation, permet alors d'introduire des non linéarités dans le réseau de neurones et est généralement de type sigmoïde ou tangente hyperbolique.

Les Machines à vecteurs de support - *Support Vecteur Machine (SVM)*. Cette méthode non paramétrique est basée sur la recherche d'un classificateur linéaire, hyperplan, et une modification de l'espace de représentation. La séparation linéaire des données initiales n'étant pas garantie, une augmentation de la dimension d'origine est réalisée pour permettre une séparation linéaire des classes. Cette modification est réalisée par une fonction noyau de type Polynomiale, Gaussienne, Sigmoïde, Laplacienne, etc. Un hyperplan permet alors la séparation des données tous en minimisant la distance entre ces deux classes. Cet hyperplan est estimé en considérant les points les plus proches entre les deux classes appelés *vecteurs de support*. Développée par [Vapnik_1979], cette méthode est

rapidement adoptée par la communauté entre autres pour sa capacité à travailler avec un grand nombre de données. Lorsque le nombre de classes est supérieur à deux, deux schémas de classification peuvent être adoptés par le SVM : la classification une classe contre une classe (*one-versus-one* 'ovo') ou la classification une classe contre toutes les autres classes (*one-versus-rest* 'ovr').

La gestion des dimensions est une question cruciale pour les algorithmes de classification. Un problème de classification est défini par une série d'individus sur lesquels sont calculés des descripteurs (*feature* ou attributs). La taille de la base de données d'étude correspond alors à la multiplication entre le nombre d'individus N et le nombre de descripteurs D . Le nombre de descripteurs influe fortement la taille de la base de données étudiée : l'ajout d'un descripteur crée une augmentation d'un facteur N fois la taille de la base de données étudiée. D'autre part, plus le nombre de descripteurs augmente, plus il faut d'individus pour « apprendre » correctement le phénomène. Un premier équilibre entre le nombre de descripteurs et la taille de la base de données d'entrée est à trouver. De même, la complexité des phases d'apprentissage des algorithmes de classification est proportionnelle à la dimension des données. La gestion de la grande dimension est un inconvénient majeur des algorithmes de classification. Qualifié de « **fléau de la dimension** » par [Bellman_1957], [Pavlenko_2001] et [Pavlenko_2003] montrent une diminution des performances des algorithmes génératifs de classification lorsque la dimension d'étude augmente. Par exemple, dans le cas d'un SVM qui cherche à augmenter les dimensions d'études afin d'observer des linéarités, cette augmentation devient difficile lorsque le nombre initial de dimensions est déjà élevé. Cette difficulté se répercute aussi en termes de temps de calcul. Différentes stratégies ont été mises en place pour palier à cette difficulté tel que l'utilisation conjointe d'algorithmes de réduction de dimension aux algorithmes de classification, tel que l'analyse en composante principale ACP [Hastie_1989, Girard_2000]. [Bouveyron_2009] présente des algorithmes spécifiquement conçus pour la classification de données de grandes dimensions : HDDA *High Dimensional Discriminant Analysis*. Cet algorithme est basé sur un modèle gaussien parcimonieux, dont les paramètres du modèle sont estimés par maximum de vraisemblance. Des méthodes de sélections automatiques d'attribut sont aussi utilisées pour réduire les dimensions d'études [Kim_2017, Li_2018, Sahan_2018]. Ces méthodes sont présentées dans 8.3.5 p 193.

Dans la communauté de détection et de classification de bateaux, plusieurs méthodes de classification sont utilisées. Parmi les méthodes présentées ci-dessus, des algorithmes génératifs de classification sont utilisés par [Lourens_1987] (classifieur Bayésien) et [Averbuch_2011] (LDA). Concernant les algorithmes de classification supervisée discriminante, [Wang_2014] utilise un SVM et des réseaux de neurone sont utilisés par [Zaugg_2010] et [Farrokhrooz_2005 a et b]. De plus, [Pradhan_2017] utilise un critère d'hypothèse de Neyman Pearson et [Wu_1999] effectue la classification par projection après une analyse par structure principale. Une méthode de type *Fuzzy* est utilisée par [Kummert_1993] et [Sierra_2015]. Cette méthode basée sur la *théorie mathématique des ensembles flous* [Zadeh_1983] où la logique booléenne est remplacée par un degré de satisfaction à une condition comprise entre 0 et 1.

8.3 Présentation des méthodes : classifieur, base d'apprentissage et sélection d'attributs

8.3.1 Présentation de la base de données

Deux bases de données sont utilisées dans ce chapitre

- Une base de données pour la détection de bateau, présentée ci-dessous.
- Une base de données pour la classification des bateaux, présentée dans le chapitre 6 : 6.3.1 p 130.

Dans un objectif de mise au point d'un détecteur de bateau et pour tester l'hypothèse où aucun bateau n'est présent, une base de données spécifiques et variées de bruits non associés à un bateau a été recueillie. Ainsi, **la base de données dédiée à la détection** comprend :

- 1084 passages de bateaux, dont 17,52 % proviennent des données enregistrées en juillet 2015 et 82,47 % proviennent des données enregistrées de Juillet 2016. Seuls les passages avec un miroir de Lloyd's plus ou moins bien marqué, non mélangé avec d'autres passages de bateau ou les séquences avec la présence de raies fortement marquées ont été sélectionnés.
- 1051 séquences « autres » de bruits biologiques, météorologiques (pluie dans notre cas) et anthropophoniques (bruit de bateau au loin).

La production sonore d'origine biologique enregistrée en juillet 2016 est principalement due à l'activité benthique (liées aux benthos, l'ensemble des organismes aquatiques vivant à proximité du fond des mers) et l'activité sonore des poissons. L'activité benthique est ce traduit par l'émission de bruits impulsionnels présents durant l'ensemble de la journée, mais s'intensifiant à la tombée de la nuit [Coquereau_2015, Lossent_2017]. Les sons produits par les poissons sont séparés en 2 sous-ensembles : les émissions individualisables et les émissions d'un chorus de poissons (bruit homogène entre 400 et 1400 Hz présent à la tombée de la nuit). Quatre types de sons individualisables de poissons sont notables dans la baie de Calvi durant l'ensemble de la journée [Parmentier_2016, Di Iorio_2018]. Des exemples de spectrogrammes de ces différents sons sont présentés dans la Figure 107.

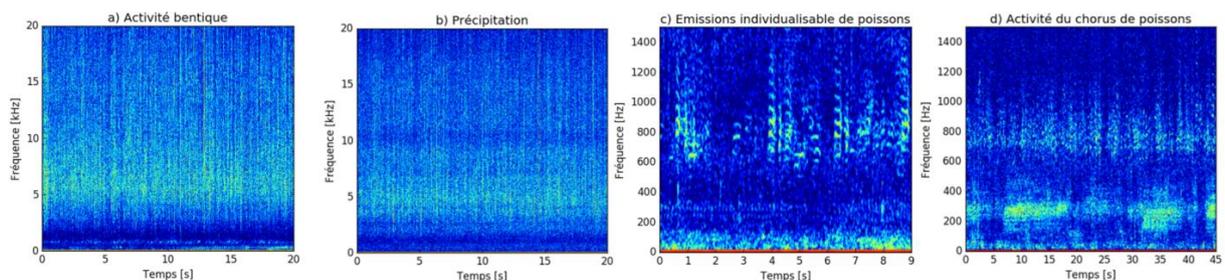


Figure 107 : Spectrogrammes d'une séquence correspondant à de l'activité benthique, des émissions de poissons individualisables, émissions du chorus de poissons, la présence d'une averse.

La Table 51 résume le nombre de séquences considérées pour chaque sous-ensemble de la base de données.

		Nombre de séquences
Bruit biologique	Emission de poisson individualisable	218
	Chorus de poissons	230
	Impulsion benthique	220
Bruit naturel abiotique	Bruits induits par la pluie	113
Bruit anthropophonique	Bruits de bateaux au loin	154
Mélange bruit anthropophonique et bruit biologique	Bruits de bateaux au loin générant un bruit de fond mélangés des bruits de poissons	116

Table 51 : Détail sur le nombre de séquences de la base de données biologiques, météorologiques et anthropiques lointaines

Pour rappel, la **base de données dédiée à la classification** est composée de 598 passages de bateaux (5980 séquences de 10 secondes), avec identification visuelle de chaque bateau et d'une série de descripteurs physiques et contextuels tels que la vitesse et la distance au CPA, la longueur et la catégorie du bateau. Le chapitre 7 a développé l'élaboration d'une arborescence de classification basée sur 3 étages de classification (Figure 108).

Chaque étage est considéré individuellement pour la classification. Ainsi, celle du 2^{ème} étage ne correspond pas à une segmentation des résultats obtenus lors de la classification du 1^{er} étage, mais à une classification de l'ensemble de la base de données en 5 classes. Cette méthode de classification évite ainsi la répercussion des erreurs aux différents étages de classification afin de définir l'étage optimale de classification.

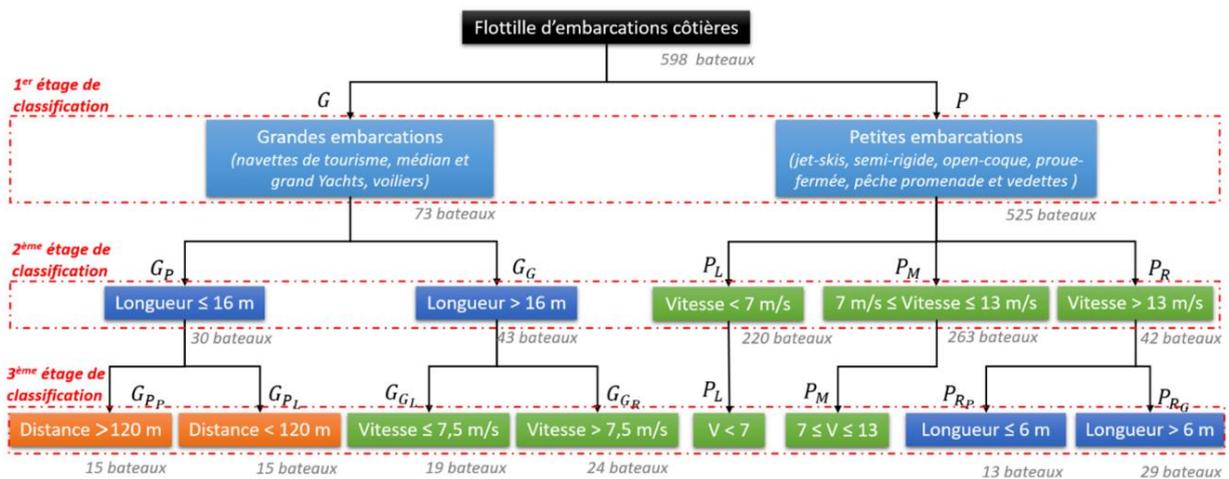


Figure 108 : Arborescence de classifications acoustiques des embarcations de la flottille côtière

8.3.2 Choix du classifieur et influence des paramètres

Trois types de classifieurs sont utilisés pour la suite de l'étude : un *random forest*, un SVM et un réseau de neurones. Ces classifieurs dépendent de paramètres d'entrées dont le choix a été réalisé sur la base de données liée à la classification des bateaux.

Dans le cas de l'algorithme des *random forest*, le nombre d'arbres de décision exécutés est paramétrable. Plus ce nombre est important, plus la probabilité de trouver l'arbre optimal augmente. Dans ce cas présent, l'augmentation du nombre d'arbres de 100 à 1000 influe de manière négligeable sur les résultats de la classification. Ainsi, pour la suite de l'étude, 100 arbres de décision seront évalués par l'algorithme.

Dans le cas de l'algorithme SVM, l'étude est réalisée en considérant des noyaux de type *Radial Basis Function*. Pour des problèmes de plus de deux classes, la classification en comparant une classe contre une autre classe (*ovo*) est retenue.

Un réseau de neurones de type perceptron multicouche est utilisé. Une augmentation du nombre de couches cachées impacte fortement le temps d'apprentissage. Dans le cas présent, cette augmentation n'apporte pas de gain quant aux résultats de la classification : une variation inférieure à 1% du pourcentage de fausse détection est observée lors du passage de 100 à 1000 couches cachées. Ainsi, 100 couches cachées sont utilisées.

8.3.3 Choix de la base d'apprentissage

Afin d'éviter tous effets dus au choix de la base d'apprentissage, 100 bases d'apprentissages seront testées. Ces bases de données sont choisies aléatoirement parmi l'ensemble des données. Les résultats de classification correspondront à la moyenne des 100 résultats obtenus.

La base de données dédiée à la détection est équilibrée entre les séquences correspondant à des bateaux proches (895 passages décomposées en 8950 sessions de 10 seconds) et les séquences sans bateau (composée de 10530 individus). La base d'apprentissage des données est alors composée des 2/3 de la base initiale, divisé en part égale entre les deux catégories : bateaux et bruits. L'algorithme sera alors testé sur le tiers des données restantes, soit 6493 individus.

La base de données dédiée à la classification présente une forte hétérogénéité dans le nombre d'éléments par classes est observée. En raison du nombre faible d'éléments présents dans certaines classes, une stratégie d'apprentissage sur 1/3 des données (et de test sur les 2/3 restants) est adoptée. Ce choix traduit un compromis entre sous-apprentissage et validité des statistiques de classification. Un fort déséquilibre du nombre d'individus par classe est observé. Ce déséquilibre est davantage prononcé lorsque l'étage de classification augmente : pour le troisième étage de classification, 263 bateaux constituent la plus grande classe contre 13 bateaux pour la plus petite classe. Cette disparité se répercute différemment sur les résultats de classification en fonction du mode de sélection de la base d'apprentissage. Trois stratégies de compositions de la base d'apprentissage sont étudiées :

- Un nombre d'individus différent pour chaque classe, correspondant à 1/3 du nombre d'individus présents dans chaque classe (*méthode 1*),
- Un nombre d'individus identique pour chaque classe, correspondant à 1/3 du nombre d'individus présents dans la classe la moins nombreuse (*méthode 2*),
- Un nombre d'individus identique pour les classes faiblement nombreuse (la méthode 2) avec un ajustement pour les classes les plus nombreuses : le nombre d'individus correspondant à $1/2 (1.5 * 1/3)$ le nombre d'individus présents dans la classe la moins nombreuse (*méthode 3*).

Le choix de la stratégie d'apprentissage de la classification des bateaux est abordé dans 8.4.1 p195 .

8.3.4 Schéma global de la classification

La Figure 109 présente le schéma de classification. Avant l'analyse par l'algorithme de classification, une étape préliminaire de normalisation des descripteurs acoustiques est réalisée : le sous ensemble de descripteurs acoustiques sélectionnés pour créer la base de données d'apprentissage est centré et réduite. La fonction de normalisation utilisée pour normaliser la base d'apprentissage est ensuite appliquée aux données de test fournies en entrée du classifieur.

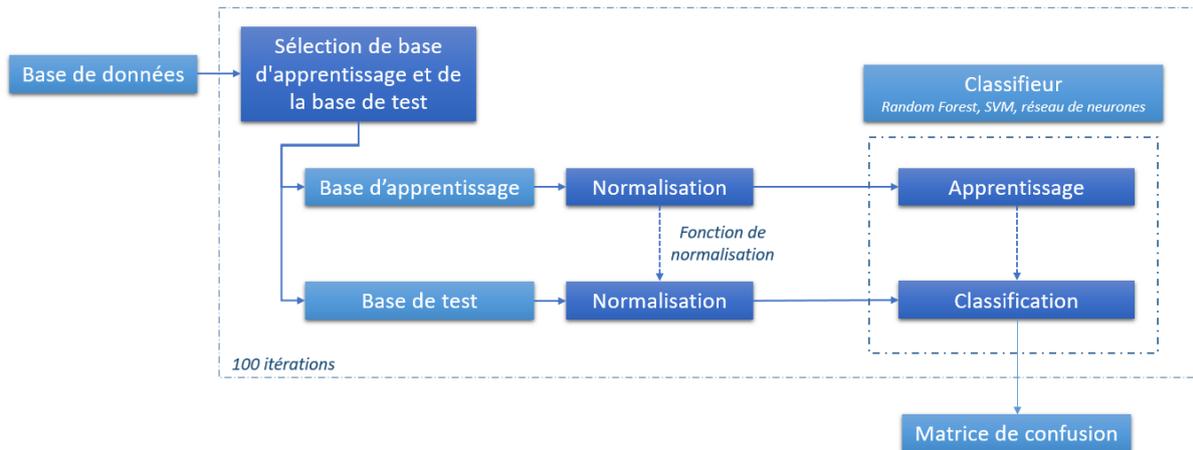


Figure 109 : Schéma de classification

8.3.5 La sélection de descripteurs

Dans le cadre de cette thèse, deux méthodes de sélection des descripteurs acoustiques ont été utilisées : une méthode de sélection manuelle et une méthode de sélection automatique.

La problématique de **sélection automatique des descripteurs acoustiques**, appelé attributs, connaît depuis le début du siècle un intérêt croissant [Liu_2000, Guyon_2003]. Outre une augmentation du temps de calcul, de la taille de la base de données, la classification en dimension trop élevée peut entraîner une diminution des performances (difficulté plus importante lors de la modélisation de l'espace des descripteurs). Parmi l'ensemble des descripteurs figurent alors des descripteurs peu pertinents, bruités ou redondants, dont la présence apporte peu d'informations lors de la classification. Deux stratégies de sélections de descripteurs apparaissent dans la littérature : la *sélection de descripteurs pertinents* et la *sélection efficace*. La notion de pertinence fait appelle à la capacité seule d'un attribut à différencier des classes. Dans le deuxième cas, le sous-ensemble retenu permet d'obtenir les meilleures performances de classification sans chercher à conserver l'ensemble des variables pertinentes et en évitant toute redondance. Les algorithmes de sélection de paramètres se composent en trois types :

- Les « *filter* » : effectuant un ordonnancement des descripteurs sur un score individuel de pertinence indépendamment du classificateur utilisé.
- Les « *wrappers* » : sélectionnant un sous-ensemble de descripteurs permettant d'obtenir les meilleures performances finales pour un classificateur donné.
- Les « *embedders* » : sélectionnant conjointement le sous-ensemble de descripteurs et optimisant le classificateur afin d'obtenir les meilleures performances finales.

Le Table 52 présente des exemples d'algorithmes de sélection de descripteurs présents dans la littérature.

Algorithme	Type	Mode de sélection	Critères de sélection	Source
Algorithme de Fisher	<i>Filter</i>	Sélection des descripteurs de meilleurs scores	Discriminant de Fisher (maximisation du rapport interclasse et minimisation de la dispersion intra-classe)	[Liu_2015, Ahmad_2017]
MUTINF	<i>Filter</i>	Sélection des descripteurs de meilleurs scores	Information mutuelle	[Bennasar_2015, Li_2017]
Inertia Ratio Maximization using Feature Space Projection (IRMFPS)	<i>Filter</i>	Ajout d'un descripteur à chaque itération	Rapport entre l'inertie interclasses et le rayon moyen de la dispersion intra-classe	[Peeters_2004, Imani_2015, Li_2018]
SVM Recursive Feature Elimination (SVM-RFE)	<i>Wrapper</i>	Elimination d'un descripteur à chaque itération	Moyenne des vecteurs de poids définissant l'hyperplan pour chaque comparaison 1 classe contre 1 classe	[Guyon_2002, Kim_2017, Sahran_2018]

Table 52 : Algorithme de sélections de descripteurs

Utilisées pour la classification des bateaux, **deux méthodes de sélection automatique d'attribut** ont été mises en place pour cette thèse et s'inspirent de la méthode de SVM *Recursive Feature Elimination* proposée par [Guyon_2002]. La première méthode fonctionne sur le même processus itératif que l'algorithme SVM-RFE : à chaque étape, un descripteur acoustique est supprimé. Le principe de cet algorithme de d'élimination réside dans l'idée que les attributs de plus faibles poids ont une utilité moindre que les autres attributs. A son initialisation, l'ensemble des descripteurs acoustiques sont considérés. L'algorithme de classification considère comme base d'apprentissage l'ensemble de la base de données. La stabilité vis-à-vis d'une sélection d'un sous-ensemble de données pour constituer la base d'apprentissage choisi n'a pas été testée. Dans la version originale, un SVM définit l'ensemble des vecteurs supports formant l'hyperplan optimal pour la classification entre deux classes. Chaque vecteur support est obtenu par pondération entre les différents descripteurs acoustiques. Le descripteur de plus faible poids est alors écarté de la liste d'attribut. Pour cette thèse, le poids associé à chaque descripteur acoustique est estimé par un *Random Forest*. La principale contrainte de cette méthode de sélection est un temps de calcul relativement long. [Guyon_2002] arrête ce processus itératif lorsqu'un nombre des descripteurs définis est atteint. Pour la méthode développée au cours de cette thèse, afin de trouver l'optimum de performance, l'algorithme recommence la classification jusqu'à ce qu'un seul attribut reste. Pour les deux types méthodes de sélection d'attributs, une suppression de l'attribut de plus faible poids est réalisée. Deux types de classifieur sont utilisés pour classer l'ensemble des individus : un SVM à noyau linéaire et un *Random Forest*. Toujours inspirée de la méthode de suppression d'un attribut à chaque itération, la deuxième méthode réalise une sélection incrémentale de l'attribut de plus fort poids. Comme précédemment, l'algorithme de *Random Forest*, réalisé sur l'ensemble de la base de données permet d'estimer le poids associé à chaque attribut. L'attribut de plus fort poids est simultanément supprimé de la liste de descripteurs à tester et incrémenter dans liste de descripteurs sélectionnés. L'algorithme de classification est exécuté sur la liste de descripteurs à tester afin de trouver le nouveau descripteur de plus fort poids jusqu'à ce qu'un seul descripteur soit présent dans la liste à tester.

La **sélection manuelle des descripteurs** exploite les résultats du chapitre 7. Lors de la création de l'arborescence de classification, un sous-ensemble de descripteurs ayant la plus forte corrélation de Spearman avec un paramètre descriptif du bateau a été sélectionné pour la détermination de chaque étage de classification. Ces paramètres correspondent à la sélection manuelle des descripteurs et sont présentés dans la Table 53. L'identification du premier étage de classification est basé sur les observations du chapitre 6. Le choix des descripteurs acoustiques associés à ce palier a été réalisé en utilisant les paramètres acoustiques présentant la meilleure corrélation avec les catégories de bateaux

et la longueur du bateau. Les descripteurs utilisés pour classer le 2^{ème} étage de classification correspondent aux paramètres associés à la sélection du 1^{er} et 2^{ème} étage de classification et l'ensemble des descripteurs présents dans la Table 53 pour classer le 3^{ème} étage.

Etage	Embranchement / Origine	Paramètres sélectionnées
1 ^{er} étage 22 descripteurs	Catégorie de bateau (5 descripteurs)	T9, T10, C3, L13, L19
	Longueur du bateau (18 descripteurs)	S72, S87, S98, H5, H15, H56, H60, H67, D13, D17, M41, M47, M63, M69, M75, C12, C16, C29
2 ^{ème} étage 44 descripteurs	Séparation en fonction de la taille des grandes embarcations (18 descripteurs)	T3, T4, S19, S33, S44, S49, S52, S96, S97, S98, H7, H48, D2, D22, M6, C12, C29, L1
	Séparation en fonction vitesse des petites embarcations (7 descripteurs)	S3, S5, S14, S16, L4, L6, L7
3 ^{ème} étage 78 descripteurs	Séparation en fonction de la distance des grandes embarcations de moins de 16 m (26 descripteurs)	S4, S15, S25, S29, S30, S36, S39, S40, S41, S55, S57, S58, S59, S60, H62, H63, M1, M2, M21, M60, M61, C2, C4, C28, L5, L7, L3, L5, L6, L7, L22, W3, W9
	Séparation en fonction de la vitesse des grandes embarcations de plus de 16 m (26 descripteurs)	S67, S74, S81, H1, H3, M2, M5, M20, M25, M34, M35, M37, M51, M52, M53, M55, C0, C1, C8, C28, C30, C31, C32, C33, C34, C35
	Séparation en fonction taille des petites embarcations rapides (9 descripteurs)	S8, S30, M11, M12, M41, M48, M63, M70, L15

Table 53 : Sélection manuelle des descripteurs acoustiques

Les résultats des deux méthodes de sélections de descripteurs sont présentés dans 0 p 197.

8.4 La détection et la classification acoustique des bateaux par apprentissage supervisé

Cette section est composée de trois sous sections présentant la détection de bateaux, la détection de bateaux au loin et la classification de bateaux. Bien que la logique veuille que le thème de la détection soit abordé en premier, la 1^{ère} section est dédiée à la classification des bateaux. En effet, la classification s'est avéré être un problème bien plus complexe que la détection de bateaux. Souhaitant trouver une même liste de descripteurs acoustiques et une même méthode de classification permettant conjointement la détection et la classification, le problème de classification a été considéré en premier. L'aspect détection a ensuite été réalisé en considérant les choix optimaux de la classification.

8.4.1 La classification acoustique des bateaux

Trois **méthodes de sélection de la base de données** sont présentées dans 8.3.3 p 192. La Table 54 présente les résultats de classification du 1^{er} et 3^{ème} étage de classification pour l'ensemble des données, en considérant un algorithme de type réseau de neurones réalisé sur 100 triages aléatoires.

Méthode 1 : Pourcentage du nombre d'individus par classe	Méthode 2 : Nombre d'individus fixe par classe	Méthode 3 : Méthode 2 avec ajustement pour les classes plus nombreuses																											
<i>Premier étage de classification</i>																													
Nombre d'individus par classe P : 1732 - G : 240	Nombre d'individus par classe P : 240 - G : 240	Nombre d'individus par classe P : 360 - G : 240																											
<table border="1"> <tr><td></td><td><i>P</i></td><td><i>G</i></td></tr> <tr><td><i>P</i></td><td>93.3%</td><td>73.2%</td></tr> <tr><td><i>G</i></td><td>6.7%</td><td>26.8%</td></tr> </table>		<i>P</i>	<i>G</i>	<i>P</i>	93.3%	73.2%	<i>G</i>	6.7%	26.8%	<table border="1"> <tr><td></td><td><i>P</i></td><td><i>G</i></td></tr> <tr><td><i>P</i></td><td>63.8%</td><td>40.1%</td></tr> <tr><td><i>G</i></td><td>36.2%</td><td>59.9%</td></tr> </table>		<i>P</i>	<i>G</i>	<i>P</i>	63.8%	40.1%	<i>G</i>	36.2%	59.9%	<table border="1"> <tr><td></td><td><i>P</i></td><td><i>G</i></td></tr> <tr><td><i>P</i></td><td>72.4 %</td><td>48.3 %</td></tr> <tr><td><i>G</i></td><td>27.6 %</td><td>51.7 %</td></tr> </table>		<i>P</i>	<i>G</i>	<i>P</i>	72.4 %	48.3 %	<i>G</i>	27.6 %	51.7 %
	<i>P</i>	<i>G</i>																											
<i>P</i>	93.3%	73.2%																											
<i>G</i>	6.7%	26.8%																											
	<i>P</i>	<i>G</i>																											
<i>P</i>	63.8%	40.1%																											
<i>G</i>	36.2%	59.9%																											
	<i>P</i>	<i>G</i>																											
<i>P</i>	72.4 %	48.3 %																											
<i>G</i>	27.6 %	51.7 %																											
<i>Troisième étage de classification</i>																													
Nombre d'individus par classe Classes nombreuses : 800 Classes peu nombreuses : 42	Nombre d'individus par classe Classes nombreuses : 42 Classes peu nombreuses : 42	Nombre d'individus par classe Classes nombreuses : 63 Classes peu nombreuses : 42																											
% classification correcte : Classes nombreuses : 57 % Classes peu nombreuses : 15 % à 25 %	% classification correcte : Classes nombreuses : 20 % Classes peu nombreuses : 28 % à 41 %	% classification correcte : Classes nombreuses : 26 % Classes peu nombreuses : 25 % à 36 %																											

Table 54 : Mode de sélection des proportions de la base d'apprentissage

Lorsque la base de données d'apprentissage est composée d'un pourcentage du nombre d'individus par classe, les résultats de la classification montrent que l'algorithme tente de classer l'ensemble des individus dans la classe la plus nombreuse. En revanche, lorsque la base de données d'apprentissage est composée du même nombre d'échantillons par classe, de meilleures performances de classification sont observées pour les classes où le nombre d'individus est faible, au détriment d'une dégradation des performances des classes où le nombre d'individus est plus fort. La troisième méthode est un compromis entre les deux premières méthodes. Cette 3^{ème} méthode minimise les erreurs d'un point de vue global, tout en étant moins discriminante pour la classification des catégories de faible nombre d'individus. Souhaitant apporter davantage de poids aux classes où le nombre d'individus est faible, la deuxième solution, correspondant à un nombre fixe d'individus et identique pour chaque classe, est conservée.

Les **trois types de classifieurs sont testés sur l'ensemble des descripteurs acoustiques**. Les tableaux ci-dessous (Table 55 à Table 57) présentent les matrices de confusion obtenues. Les statistiques obtenues ont été observées pour 100 bases d'apprentissage aléatoires identique entre les trois classifieurs. D'un point de vue général, les trois algorithmes présentent des résultats similaires. Présentant pourtant de moins bons résultats pour le 1^{er} étage de classification, de meilleures performances de classification sont observées lors de l'utilisation des *Random Forest* au 2^{ème} et 3^{ème} étage. L'algorithme de *Random Forest* est donc choisi pour la suite de cette thèse. Pour les trois types de classifieurs, les résultats obtenus ne permettent pas une classification « *correcte* » des bateaux. Pour le premier niveau de classification, les résultats présentés sont un peu faibles : une classification correcte est observée pour seulement plus de 55% des individus. Les probabilités de classification correcte chutent pour les deux étages de classification suivants : entre 27 et 50% pour le deuxième étage et entre 18% et 54 % pour le troisième étages. Ces pourcentages sont toutefois supérieurs à ceux obtenus en considérant le tirage aléatoire d'une variable : 50% pour le 1^{er} étage, 20 % pour le 2^{ème} étage et 12.5 % pour le 3^{ème} étage. Pour ces deux niveaux, les algorithmes présentent une difficulté de classification avec les deux classes où le nombre d'individus est conséquent : les petites embarcations de vitesse lente et modéré. Les pourcentages cumulés de fausse détection et fausses alarmes avec ces deux classes sont compris entre 18 et 30 % (en bleu). Les pourcentages de fausses détections avec les autres classes sont plus faibles entre 4 et 10 %. De même, les plus faibles performances de classification sont observées pour ces deux classes. De plus, le pourcentage de détections correctes de ces deux classes est plus faible que pour les autres classes.

Classifieur Random Forest

	P	G
P	72.3	43.6
G	27.7	56.4

Classifieur SVM

	P	G
P	66.6	42.2
G	33.4	57.8

Classifieur Réseaux de Neurone

	P	G
P	63.5	40
G	36.5	60

Table 55 : Matrice de confusion du premier étage de classification en pourcentage

Classifieur Random Forest

	P_L	P_M	P_R	G_P	G_G
P_L	32,7	24,5	16,5	17,4	18,6
P_M	22,2	29,8	15,2	13,9	16,3
P_R	13,5	14,5	46,4	6,9	9,4
G_P	15,0	14,3	8,7	51,4	11,5
G_G	16,5	16,9	13,2	10,4	44,2

Classifieur SVM

	P_L	P_M	P_R	G_P	G_G
P_L	29,7	24,3	16,2	18,4	19,5
P_M	22,5	27,7	16,2	15,5	17,9
P_R	14,8	16,7	43,5	10,0	11,3
G_P	16,6	14,9	10,4	43,1	13,4
G_G	16,3	16,3	13,7	13,1	38

Classifieur Réseaux de Neurone

	P_L	P_M	P_R	G_P	G_G
P_L	28,8	23,2	17,9	18,1	19,0
P_M	22,5	29,0	17,5	16,2	18,0
P_R	15,9	16,8	41,0	11,4	13,1
G_P	14,8	13,6	9,8	40,1	12,7
G_G	18,0	17,3	13,8	14,3	37,2

Table 56 : Matrice de confusion du deuxième étage de classification en pourcentage

Classifieur Random Forest

	P_L	P_M	P_{RP}	P_{RG}	G_{PP}	G_{PL}	G_{GL}	G_{GR}
P_L	20,5	16,8	9,0	12,0	10,6	11,4	9,8	12,6
P_M	15,1	18,7	8,2	10,8	8,7	10,2	9,4	12,9
P_{RP}	9,7	10,0	50,5	8,9	6,0	5,5	5	6,9
P_{RG}	9,9	10,6	6,7	36,0	4,5	5,1	7,3	6,3
G_{PP}	14,3	13,3	9,1	7,1	54,0	10,3	7,5	9,4
G_{PL}	8,7	8,5	5,4	5,9	6,0	41,2	6,7	9,5
G_{GL}	11,6	11,3	6,3	11,4	4,6	8,1	45,9	11,3
G_{GR}	10,1	10,8	4,9	7,8	5,5	8,1	8,4	31

Classifieur SVM

	P_L	P_M	P_{RP}	P_{RG}	G_{PP}	G_{PL}	G_{GL}	G_{GR}
P_L	21.2	18.7	12.2	13.4	14.7	14.7	12.7	15.1
P_M	16.8	19.4	11.2	14.1	11.3	12.6	11.7	15.
P_{RP}	7.5	7.7	38.3	8.2	6.2	4.9	4.3	5.9
P_{RG}	11.2	12.8	9.3	34.1	7.0	7.4	9.7	8.3
G_{PP}	12.9	11.7	10.9	6.1	41.2	9.4	6.4	9.6
G_{PL}	8.8	8.1	6.2	5.3	6.4	33.	6.3	9.5
G_{GL}	10.6	10.	5.7	10.6	4.8	8.1	38.2	10.9
G_{GR}	11.	11.6	6.1	8.3	8.4	9.8	10.7	25.7

Classifieur Réseaux de Neurone

	P_L	P_M	P_{RP}	P_{RG}	G_{PP}	G_{PL}	G_{GL}	G_{GR}
P_L	19,7	17,1	11,1	12,4	11,7	11,6	12,2	12,8
P_M	16,4	19,7	10,2	12,5	11,5	11,5	10,5	14,3
P_{RP}	8,8	8,9	41,0	7,2	5,9	6,4	5,5	7,8
P_{RG}	11,6	12,5	8,6	35,1	7,9	6,9	10,6	7,8
G_{PP}	11,3	10,4	8,1	7,8	41,7	10,0	6,5	8,6
G_{PL}	9,9	9,7	6,9	6,6	7,3	34,5	6,9	10,7
G_{GL}	10,1	8,6	5,4	10,2	5,1	8,1	38,6	9,2
G_{GR}	12,2	13,1	8,6	8,2	8,9	11,0	9,3	28,8

Nom	Détail
P	Petites embarcations
P_L	Petites embarcations lentes ($v < 7\text{m/s}$)
P_M	Petites embarcations de vitesse modérée ($7 < v < 13\text{ m/s}$)
P_R	Petites embarcations de rapide ($13\text{ m/s} < v$)
P_{RP}	Petites embarcations de rapide de moins de 6 m de longueur
P_{RG}	Petites embarcations de rapide de plus de 6 m de longueur
G	Grandes embarcations
G_P	Grandes embarcations de moins de 16 m de longueur
G_{PP}	Grandes embarcations de moins de 16 m de longueur proche ($d < 120\text{ m}$)
G_{PL}	Grandes embarcations de moins de 16 m de longueur loin ($d > 120\text{ m}$)
G_G	Grandes embarcations de plus de 16 m de longueur
G_{GL}	Grandes embarcations de plus de 16 m de longueur lente ($v < 7.5\text{ m/s}$)
G_{GR}	Grandes embarcations de plus de 16 m de longueur rapide ($v > 7.5\text{ m/s}$)

Table 57 : Matrice de confusion du troisième étage de classification en pourcentage

L'utilisation de l'ensemble des descripteurs acoustiques présent de faibles résultats de classification. Une **réduction du nombre de dimension** est alors réalisée selon trois méthodes : l'ACP, une sélection manuelle des paramètres présentant individuellement les plus d'intérêts et une sélection automatique des descripteurs acoustiques optimaux.

La **réduction des dimensions par ACP** ne permet pas une amélioration des résultats. La conservation de 17 premières composantes principales traduisant 50 % de la variance initiale présente une régression par rapport aux résultats précédents. Une diminution des pourcentages de détections correctes est observée pour l'ensemble des étages et l'ensemble des classifieurs [Table 58]. L'influence des deux classes de petites embarcations lente et de vitesse modérée perturbant le 2^{ème} et le 3^{ème} étage de classification est toujours fortement présente. Le pourcentage de non détection de ces deux classes et de fausses détections avec ces deux classes sont toujours supérieurs à ceux observés pour les autres classes et atteignent un pourcentage cumulé entre 21 et 26 %. Cette diminution de performance est aussi présente lorsque l'on considère les 75 premières composantes principales représentant 80 % de la variance initiale. Les résultats restent moins favorables aux résultats obtenus lorsque pour l'ensemble des descripteurs acoustiques.

	1 ^{er} étage de classification	2 ^{ème} étage de classification	3 ^{ème} étage de classification
Ensemble des descripteurs	56% à 72%	27 % à 51 %	18% à 54%
Composantes principales représentant 50 % de la variance initiale	53 et 66 %	27 % et 41 %	10 % et 44 %
Composantes principales représentant 80 % de la variance initiale	48% et 70%	29% et 39 %	10% et 39.5%

Table 58 : Pourcentage de classification correcte en fonction du nombre de composante principale considérée

1^{er} étage de classification

	P	G
P	67.4	46.7
G	32.6	53.3

2^{ème} étage de classification

	P _L	P _M	P _R	G _P	G _G
P _L	29.1	24.	16.9	18.1	20.
P _M	22.9	27.9	17.2	16.2	17.6
P _R	14.8	16.7	41.3	11.5	11.7
G _P	16.	15.	10.8	40.4	12.8
G _G	17.2	16.4	13.8	13.8	37.9

3^{ème} étage de classification

	P _L	P _M	P _{Rp}	P _{Rg}	G _{Pp}	G _{Pl}	G _{Gl}	G _{Gr}
P _L	18.9	16.6	11.3	11.2	12.5	11.9	11.3	18.9
P _M	15.1	17.5	9.9	11.7	10.1	10.8	9.7	15.1
P _{Rp}	9.8	9.9	39.9	9.3	7.7	7.2	5.7	9.8
P _{Rg}	10.3	12.2	7.5	34.5	5.	7.2	9.2	10.3
G _{Pp}	13.4	12.2	9.9	6.8	44.8	10.2	7.1	13.4
G _{Pl}	9.4	9.8	8.	6.5	5.6	33.5	8.3	9.4
G _{Gl}	12.6	11.4	6.7	11.5	5.9	10.1	41.2	12.6
G _{Gr}	10.4	10.4	6.9	8.5	8.4	9.1	7.5	10.4

Nom	Détail	Nom	Détail
P	Petites embarcations	G	Grandes embarcations
P _L	Petites embarcations lentes (v < 7m/s)	G _P	Grandes embarcations de moins de 16 m de longueur
P _M	Petites embarcations de vitesse modérée (7 < v < 13 m/s)	G _{Pp}	Grandes embarcations de moins de 16 m de longueur proche (d < 120 m)
P _R	Petites embarcations de rapide (13 m/s < v)	G _{Pl}	Grandes embarcations de moins de 16 m de longueur loin (d > 120 m)
P _{Rp}	Petites embarcations de rapide de moins de 6 m de longueur	G _G	Grandes embarcations de plus de 16 m de longueur
P _{Rg}	Petites embarcations de rapide de plus de 6 m de longueur	G _{Gl}	Grandes embarcations de plus de 16 m de longueur lente (v < 7.5 m/s)
		G _{Gr}	Grandes embarcations de plus de 16 m de longueur rapide (v > 7.5 m/s)

Table 59 : Matrice de confusion en pourcentage en conservant 50 % de la variance de l'ACP

1^{er} étage de classification

	P	G
P	70.3	51.3
G	29.7	48.7

2^{ème} étage de classification

	P _L	P _M	P _R	G _P	G _G
P _L	31.5	25.9	18.6	21.2	22.3
P _M	23.9	29.3	19.1	19.1	20.
P _R	14.2	15.7	39.6	10.	11.4
G _P	14.8	13.7	10.1	37.2	12.6
G _G	15.6	15.4	12.6	12.4	33.7

3^{ème} étage de classification

	P _L	P _M	P _{Rp}	P _{Rg}	G _{Pp}	G _{Pl}	G _{Gl}	G _{Gr}
P _L	21.2	18.1	12.3	13.5	13.3	14.3	14.4	21.2
P _M	16.6	19.6	11.9	13.2	12.7	13.2	12.2	16.6
P _{Rp}	9.3	9.6	39.3	8.5	8.	7.3	6.2	9.3
P _{Rg}	11.3	12.1	7.1	33.2	6.8	8.3	9.9	11.3
G _{Pp}	11.9	11.2	7.8	7.7	37.8	10.7	7.4	11.9
G _{Pl}	9.4	9.2	7.4	6.8	7.5	29.4	7.3	9.4
G _{Gl}	10.4	9.6	6.2	9.9	6.1	7.4	34.8	10.4
G _{Gr}	10.	10.7	7.9	7.2	7.9	9.4	7.8	10.

Table 60 : Matrice de confusion en pourcentage en conservant 80 % de la variance de l'ACP

La réduction des dimensions est alors réalisée en utilisant les descripteurs acoustiques issus de la sélection manuelle. Excepté pour le premier niveau de classification, de meilleures performances de classification sont notées. Les deux classes de petites embarcations lentes et de vitesse modérée présente les mêmes observations : faibles pourcentages de détections correctes et forte probabilité de fausses alarmes avec les autres classes. Excepté pour ces deux classes, le pourcentage de détections correctes est alors compris entre 40 % et 43 % pour le 2^{ème} étage et entre 36 % et 55 % pour le 2^{ème} étage. La liste de descripteurs acoustiques dédiée à la classification du 3^{ème} étage de classification est alors utilisée pour les deux premiers étages. Les résultats correspondent aux tableaux : 1^{er} étage (descripteurs 3^{ème} étage) et 2^{ème} étage de classification (descripteurs 3^{ème} étage). Les performances augmentent globalement avec une plus forte augmentation de performance pour les classes peu nombreuses : entre 47 % et 54 % pour le 2^{ème} étage. Ces résultats restent cependant un peu faibles.

1^{er} étage

	<i>P</i>	<i>G</i>
<i>P</i>	64.4	50.2
<i>G</i>	35.6	49.8

2^{ème} étage de classification

	<i>P_L</i>	<i>P_M</i>	<i>P_R</i>	<i>G_P</i>	<i>G_G</i>
<i>P_L</i>	29.8	23.9	16.3	19.8	19.6
<i>P_M</i>	21.2	26.1	16.4	15.1	16.7
<i>P_R</i>	13.4	15.3	41.7	9.5	12.
<i>G_P</i>	16.8	16.1	10.8	43.5	11.6
<i>G_G</i>	18.7	18.6	14.8	12.1	40.2

3^{ème} étage de classification

	<i>P_L</i>	<i>P_M</i>	<i>P_{RP}</i>	<i>P_{RG}</i>	<i>G_{PP}</i>	<i>G_{PL}</i>	<i>G_{GL}</i>	<i>G_{GR}</i>
<i>P_L</i>	21.1	16.7	8.2	11.1	9.2	10.6	10.3	12.7
<i>P_M</i>	15.9	20.2	7.1	10.8	8.1	9.5	9.5	13.
<i>P_{RP}</i>	9.5	9.8	54.9	8.2	5.5	6.7	4.6	6.3
<i>P_{RG}</i>	10.6	11.4	5.8	41.	4.4	5.	6.6	6.4
<i>G_{PP}</i>	11.6	10.4	7.8	5.2	55.6	7.3	5.6	6.6
<i>G_{PL}</i>	8.7	8.6	5.6	6.1	5.9	46.4	6.	8.6
<i>G_{GL}</i>	11.5	10.5	5.9	9.5	5.8	6.7	48.8	10.
<i>G_{GR}</i>	11.	12.3	4.7	8.2	5.5	7.7	8.7	36.3

1^{er} étage(descripteurs3^{ème} étage)

	<i>P</i>	<i>G</i>
<i>P</i>	70.7	41.3
<i>G</i>	29.3	58.7

2^{ème} étage de classification(descripteurs 3^{ème} étage)

	<i>P_L</i>	<i>P_M</i>	<i>P_R</i>	<i>G_P</i>	<i>G_G</i>
<i>P_L</i>	32.9	23.3	15.	15.3	17.1
<i>P_M</i>	21.5	30.8	14.1	13.6	16.7
<i>P_R</i>	14.	15.1	49.3	6.8	8.6
<i>G_P</i>	14.	13.2	9.2	53.7	9.7
<i>G_G</i>	17.5	17.6	12.5	10.6	47.8

Nom	Détail
<i>P</i>	Petites embarcations
<i>P_L</i>	Petites embarcations lentes ($v < 7$ m/s)
<i>P_M</i>	Petites embarcations de vitesse modérée ($7 < v < 13$ m/s)
<i>P_R</i>	Petites embarcations de rapide (13 m/s $< v$)
<i>P_{RP}</i>	Petites embarcations de rapide de moins de 6 m de longueur
<i>P_{RG}</i>	Petites embarcations de rapide de plus de 6 m de longueur
<i>G</i>	Grandes embarcations
<i>G_P</i>	Grandes embarcations de moins de 16 m de longueur
<i>G_{PP}</i>	Grandes embarcations de moins de 16 m de longueur proche ($d < 120$ m)
<i>G_{PL}</i>	Grandes embarcations de moins de 16 m de longueur loin ($d > 120$ m)
<i>G_G</i>	Grandes embarcations de plus de 16 m de longueur
<i>G_{GL}</i>	Grandes embarcations de plus de 16 m de longueur lente ($v < 7.5$ m/s)
<i>G_{GR}</i>	Grandes embarcations de plus de 16 m de longueur rapide ($v > 7.5$ m/s)

Table 61 : Matrice de confusion après sélection manuelle des descripteurs et utilisation du Random Forest

La réduction des dimensions par sélection automatique d'attributs est réalisée au moyen des deux méthodes basées sur l'algorithme des *Random Forest* avec la sélection de l'attribut de plus fort poids ou la suppression de l'attribut de plus faible poids, présentée dans 8.3.5 p 193. La Figure 110 présente le pourcentage de détections correctes moyen observé en fonction du nombre d'attributs sélectionnés. D'un point de vue global, la même évolution est observée pour les deux méthodes de sélection de paramètres et pour les 3 étages de classification. Le pourcentage de détections correctes augmente pour atteindre un maximum global vers environ 50 descripteurs, puis diminue lentement pour atteindre le résultat obtenu pour l'ensemble paramètres. Ce maximum diffère en fonction de l'étage de classification et de la catégorie de paramètres. Pour ce maximum optimal, le pourcentage de détections correctes moyen augmente de 38 % à 48 % mais reste faible. En amont de ce maximum global, la méthode basée sur la sélection de l'attribut de plus fort poids permet, à nombre égaux d'attributs, d'obtenir un plus fort pourcentage de détections correctes moyennes, et inversement en aval du maximum global. Le plus fort pourcentage est observé pour la méthode de suppression de l'algorithme de plus faible poids : cette méthode est donc privilégiée pour la suite de la sous-section.

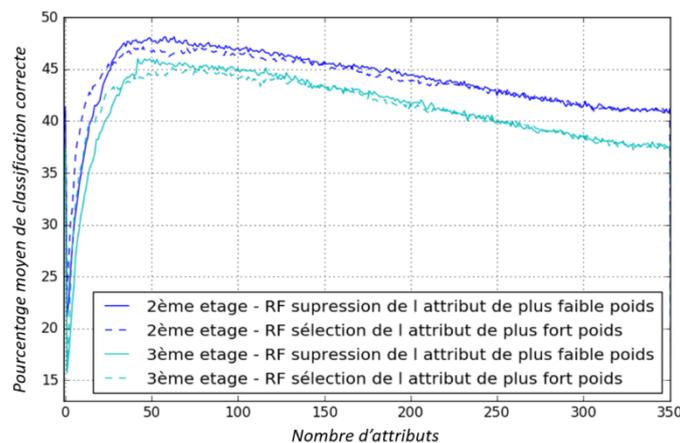


Figure 110 : Evolution du pourcentage de détection correcte en fonction du nombre de paramètres acoustiques sélectionnés

La Table 62 présente la sélection de descripteurs optimaux trouvés par la méthode de sélection automatique à suppression de l'attribut de plus faible poids. Cette méthode de sélection permet alors de passer de 383 descripteurs à un nombre réduit compris entre 43 et 59 descripteurs en fonction de l'étage de classification considéré. Les descripteurs sélectionnés sont majoritairement basés sur l'analyse des MFCC à 59.5 %, l'analyse spectrale à 18.5 % et sur l'analyse cepstrale à 15.7 %. La contribution des autres méthodes d'analyse est faible: analyse temporelle, de la distribution d'harmoniques, DEMON, sur le spectrogramme et par paquet d'ondelettes. Moins de 3 descripteurs ont été sélectionnés par chaque espace de représentation et par étage. Aucun paramètre issu de l'analyse par ondelettes n'a été retenu pour les trois étages de classification.

Liste des descripteurs acoustiques issus de la sélection automatique d'attribut sur l'ensemble des descripteurs acoustiques	
1 ^{er} étage de classification : 44 descripteurs	T0 T5 S13 S37 S49 S53 S61 S65 S67 S81 H63 D11 D12 D17 M0 M4 M5 M7 M8 M9 M10 M11 M12 M13 M14 M16 M18 M21 M26 M33 M34 M36 M56 M59 M61 M80 C0 C1 C2 C14 C15 C16 C29 C37
2 ^{ème} étage de classification : 59 descripteurs	T0 S7 S15 S18 S29 S30 S53 S59 S60 S61 S65 S74 S86 D12 M0 M1 M2 M3 M4 M5 M6 M7 M8 M9 M10 M11 M12 M13 M14 M16 M17 M18 M19 M21 M22 M23 M24 M25 M26 M27 M29 M30 M31 M32 M34 M36 M37 M38 M53 M61 M71 C0 C1 C2 C3 C11 C13 C14 C29
3 ^{ème} étage de classification : 43 descripteurs	T0 S15 S18 S30 S60 S65 S74 S86 M1 M2 M3 M4 M5 M7 M8 M11 M12 M13 M14 M16 M17 M18 M21 M23 M24 M25 M26 M29 M30 M32 M34 M36 M38 M51 M53 M61 C2 C9 C11 C13 C14 C29 L15

Table 62 : Sélection de descripteurs optimaux réalisés par l'algorithme de sélection automatiques d'attribut

La sélection automatique des attributs sur l'ensemble des paramètres permet d'obtenir de meilleures performances que la sélection manuelle des attributs. Excepté pour les deux classes de petites embarcations lentes, le pourcentage de détection correct devient supérieur à 40 % pour la majorité des classes, mais reste inférieur à 65 %.

1 ^{er} étage			2 ^{ème} étage de classification					3 ^{ème} étage de classification									
	P	G	P _L	P _M	P _R	G _P	G _G	P _L	P _M	P _{RP}	P _{RG}	G _{PP}	G _{PL}	G _{GL}	G _{GR}		
P	74.9	38.5	P _L	37.1	24.7	14.4	13.	16.7	P _L	24.4	18.3	8.4	11.7	8.5	9.6	9.9	12.4
G	25.1	61.5	P _M	23.2	35.4	13.	11.8	14.6	P _M	17.3	23.9	7.1	10.8	7.1	10.3	7.3	12.4
			P _R	12.8	13.5	55.4	6.1	8.2	P _{RP}	9.	8.9	61.1	6.	3.4	4.7	3.9	6.7
			G _P	10.9	10.4	6.5	59.5	7.4	P _{RG}	10.5	10.6	3.8	46.4	3.1	4.8	6.8	6.1
			G _G	16.	15.9	10.7	9.6	53.2	G _{PP}	9.9	9.1	5.3	4.7	65.5	4.8	4.	5.8
									G _{PL}	7.9	8.1	4.2	4.8	3.7	52.2	6.5	7.4
									G _{GL}	10.8	9.3	5.3	9.1	3.9	7.2	54.	8.6
									G _{GR}	10.2	11.8	4.8	6.4	4.7	6.3	7.6	40.6

Nom	Détail	Nom	Détail
P	Petites embarcations	G	Grandes embarcations
P _L	Petites embarcations lentes (v < 7m/s)	G _P	Grandes embarcations de moins de 16 m de longueur
P _M	Petites embarcations de vitesse modérée (7 < v < 13 m/s)	G _{PP}	Grandes embarcations de moins de 16 m de longueur proche (d < 120 m)
P _R	Petites embarcations de rapide (13 m/s < v)	G _{PL}	Grandes embarcations de moins de 16 m de longueur loin (d > 120 m)
P _{RP}	Petites embarcations de rapide de moins de 6 m de longueur	G _G	Grandes embarcations de plus de 16 m de longueur
P _{RG}	Petites embarcations de rapide de plus de 6 m de longueur	G _{GL}	Grandes embarcations de plus de 16 m de longueur lente (v < 7.5 m/s)
		G _{GR}	Grandes embarcations de plus de 16 m de longueur rapide (v > 7.5 m/s)

Table 63 : Matrice de confusion après sélection automatiques des descripteurs et utilisation du Random Forest

Afin de vérifier l'intérêt d'une étude multiméthode d'analyse, la classification est réalisée sur chaque sous ensemble de descripteurs associés à une seule méthode d'analyse. Aucune sélection d'attribut n'est réalisée dans un premier temps. Seuls trois méthodes d'analyses présentes des résultats pertinents : l'analyse spectrale, l'analyse de MFCC et l'analyse du cepstre. Cette observation confirme les résultats de la sélection automatique sur l'ensemble des descripteurs acoustiques où la majorité des descripteurs acoustiques retenus appartenaient à ces trois sous-ensembles. Les matrices de confusion associées à ces trois méthodes sont présentées de la Table 64 à la Table 66. Parmi ces trois sous-ensembles, seul le sous-ensemble de descripteurs MFCC présente de meilleurs résultats que l'ensemble des descripteurs acoustiques et même de meilleurs résultats que la sélection manuelle des

descripteurs acoustiques. Ces résultats ne permettent cependant pas une classification robuste : les résultats restent un peu faibles. La difficulté liée aux deux classes de petites embarcations non rapide persiste. Les autres méthodes d'analyses (temporelle, de la distribution d'harmonique, DEMON, le spectrogramme et par paquet d'ondelette) montrent des pourcentages de classification correcte supérieurs à ceux obtenus en effectuant un tirage aléatoire. Ces pourcentages sont cependant très faibles et proches de cette valeur critique, ainsi que des pourcentages de fausses détections : ils sont compris pour le premier étage entre 50 % et 56 %, pour le deuxième étage entre 22 et 27 % (valeur d'un tirage aléatoire de 20%) et pour le troisième étage entre 14 et 20 % (valeur d'un tirage aléatoire de 12.5%).

1^{er} étage de classification

	P	G
P	69.1	44.6
G	30.9	55.4

2^{ème} étage de classification

	P _L	P _M	P _R	G _P	G _G
P _L	31.1	23.5	16.3	17.4	17.3
P _M	21.2	27.9	16.3	14.8	17.
P _R	14.3	16.3	43.9	9.6	11.1
G _P	16.6	15.1	10.4	47.7	12.
G _G	16.7	17.2	13.1	10.5	42.5

3^{ème} étage de classification

	P _L	P _M	P _{RP}	P _{RG}	G _{PP}	G _{PL}	G _{GL}	G _{GR}
P _L	19.5	16.	8.8	12.3	11.8	11.7	10.6	11.8
P _M	14.8	18.	8.9	12.3	9.	10.	8.9	12.3
P _{RP}	10.1	10.5	44.	9.5	7.	6.5	4.9	6.9
P _{RG}	9.8	10.9	8.8	33.5	5.7	5.7	7.9	8.2
G _{PP}	14.7	13.3	10.9	8.	48.3	10.9	8.8	10.
G _{PL}	10.4	9.9	7.2	7.	8.6	40.	7.6	10.2
G _{GL}	10.7	10.7	5.8	9.	4.4	7.	41.1	12.1
G _{GR}	9.9	10.8	5.5	8.5	5.1	8.3	10.2	28.4

Nom	Détail	Nom	Détail
P	Petites embarcations	G	Grandes embarcations
P _L	Petites embarcations lentes (v < 7m/s)	G _P	Grandes embarcations de moins de 16 m de longueur
P _M	Petites embarcations de vitesse modérée (7 < v < 13 m/s)	G _{PP}	Grandes embarcations de moins de 16 m de longueur proche (d < 120 m)
P _R	Petites embarcations de rapide (13 m/s < v)	G _{PL}	Grandes embarcations de moins de 16 m de longueur loin (d > 120 m)
P _{RP}	Petites embarcations de rapide de moins de 6 m de longueur	G _G	Grandes embarcations de plus de 16 m de longueur
P _{RG}	Petites embarcations de rapide de plus de 6 m de longueur	G _{GL}	Grandes embarcations de plus de 16 m de longueur lente (v < 7.5 m/s)
		G _{GR}	Grandes embarcations de plus de 16 m de longueur rapide (v > 7.5 m/s)

Table 64 : Matrice de confusion en pourcentage – SPECTRALE

1^{er} étage de classification

	P	G
P	73.7	40.7
G	26.3	59.3

2^{ème} étage de classification

	P _L	P _M	P _R	G _P	G _G
P _L	35.8	25.8	15.4	14.6	18.1
P _M	23.	33.2	13.3	14.1	15.9
P _R	13.7	12.9	51.3	6.3	8.7
G _P	11.4	11.7	8.	56.	9.
G _G	16.2	16.4	11.9	9.	48.3

3^{ème} étage de classification

	P _L	P _M	P _{RP}	P _{RG}	G _{PP}	G _{PL}	G _{GL}	G _{GR}
P _L	23.3	18.3	8.1	13.3	8.2	10.4	10.4	12.6
P _M	16.4	22.1	7.2	10.6	8.8	10.1	8.3	12.7
P _{RP}	10.5	8.9	57.6	5.5	3.6	6.8	5.2	7.4
P _{RG}	10.3	10.2	3.5	41.7	3.5	5.3	6.9	5.7
G _{PP}	9.7	9.6	6.6	5.9	61.4	6.	4.2	7.5
G _{PL}	7.9	8.6	6.4	5.4	3.8	48.3	5.2	7.9
G _{GL}	10.7	10.1	5.3	10.5	3.9	5.9	51.4	8.2
G _{GR}	11.2	12.2	5.3	7.	6.8	7.1	8.4	38.

Table 65 : Matrice de confusion en pourcentage – MFCC

1^{er} étage de classification

	P	G
P	67.5	45
G	32.5	55

2^{ème} étage de classification

	P _L	P _M	P _R	G _P	G _G
P _L	30.	23.1	16.	17.5	18.7
P _M	21.3	26.	15.7	14.6	16.5
P _R	15.6	17.1	46.1	8.6	12.2
G _P	15.6	15.5	9.9	46.5	12.6
G _G	17.4	18.2	12.3	12.8	40.

3^{ème} étage de classification

	P _L	P _M	P _{RP}	P _{RG}	G _{PP}	G _{PL}	G _{GL}	G _{GR}
P _L	19.	15.6	8.5	11.8	11.4	11.4	11.3	12.4
P _M	14.6	16.8	9.2	11.1	8.2	11.3	8.9	12.5
P _{RP}	9.7	10.8	47.2	11.5	6.4	4.	6.	7.8
P _{RG}	10.4	10.7	8.6	31.7	5.3	6.5	7.7	7.4
G _{PP}	13.7	12.3	8.5	8.	49.6	10.4	7.3	10.1
G _{PL}	10.1	10.8	5.3	7.2	5.9	38.6	8.5	10.1
G _{GL}	12.	11.3	6.6	10.3	6.6	9.3	41.4	11.7
G _{GR}	10.6	11.6	6.2	8.4	6.6	8.5	8.9	28.

Table 66 : Matrice de confusion en pourcentage – CEPSTRE

Les algorithmes de sélection automatiques d'attributs sont alors appliqués de manière individuelle sur ces trois méthodes d'analyse : spectrale, cepstrale et des coefficients MFCC. La Figure 111 représente l'évolution du pourcentage de détection correcte en fonction du nombre de paramètres

acoustiques considérés pour les deux méthodes de sélection automatique d'attributs : la sélection du paramètre ayant le plus fort poids ou suppression du paramètre ayant le moins de poids. L'évolution du pourcentage moyenne de détection correcte en fonction du nombre d'attributs présente la même évolution que lors de la sélection automatique sur l'ensemble des paramètres : augmentation vers un maximum global suivi d'un diminue lente. Une différence de performance est observée entre les méthodes de sélection d'attributs. Pour la méthode correspondant à la sélection du paramètre ayant le poids maximum, le pourcentage de détection correcte est logiquement plus important lorsqu'un seul paramètre est considéré. A l'inverse, le deuxième maximum local est obtenu pour un nombre de paramètres plus important et correspondant à un pourcentage de détection correct plus faible. La méthode de sélection par suppression du paramètre de plus faible poids est alors sélectionnée pour la suite de l'étude. Pour cette méthode de sélection d'attribut, le maximum global correspond au deuxième maximum local, excepté pour l'analyse cepstrale. La Table 67 présente la sélection de descripteurs optimaux trouvés par l'algorithme de sélection automatiques d'attributs.

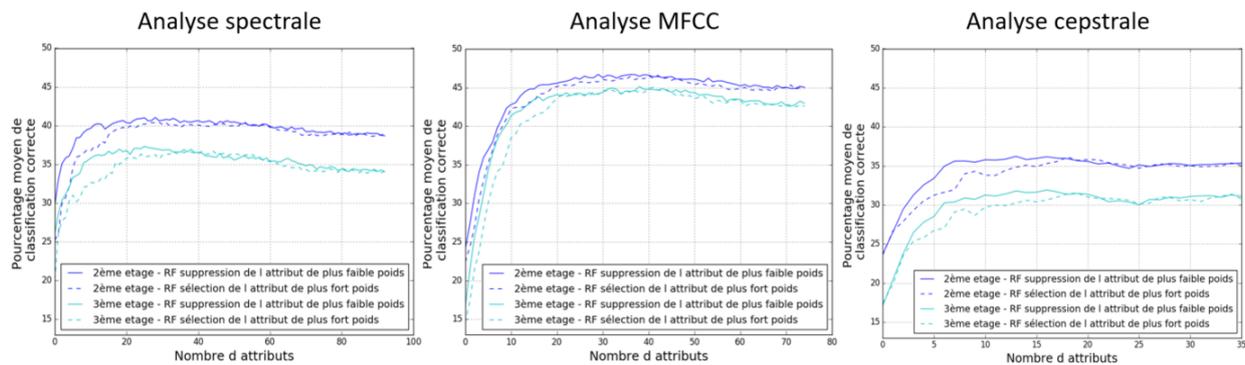


Figure 111 : évolution du pourcentage de détection correcte en fonction du nombre de paramètres acoustiques considérés pour l'analyse spectrale (à gauche), MFCC (au centre) et cepstrale (à droite)

	Analyse spectrale	Analyse des coefficients MFC	Analyse cepstrale
1er étage de classification	24 descripteurs: S7 S8 S11 S13 S15 S18 S27 S28 S29 S37 S38 S53 S60 S61 S62 S64 S65 S67 S68 S74 S77 S80 S81 S86	47 descripteurs: M0 M1 M2 M3 M4 M5 M7 M8 M9 M10 M11 M12 M13 M14 M15 M16 M17 M18 M20 M21 M22 M23 M24 M26 M29 M30 M32 M33 M34 M35 M36 M37 M38 M39 M40 M41 M43 M49 M51 M52 M54 M55 M56 M61 M62 M71 M80	11 descripteurs: C0 C2 C4 C9 C13 C15 C16 C28 C29 C33 C37
2ème étage de classification	30 descripteurs: S7 S13 S14 S15 S18 S24 S29 S30 S36 S37 S40 S42 S45 S53 S55 S57 S58 S59 S60 S62 S64 S65 S67 S68 S74 S76 S79 S80 S81 S86	38 descripteurs: M0 M1 M2 M3 M4 M5 M6 M7 M8 M9 M10 M11 M12 M13 M14 M16 M17 M18 M19 M21 M22 M23 M24 M25 M26 M29 M30 M31 M34 M36 M37 M38 M41 M49 M51 M53 M60 M61	15 descripteurs: C0 C1 C2 C4 C6 C9 C11 C12 C13 C14 C19 C28 C29 C33 C37
3ème étage de classification	27 descripteurs: S6 S7 S12 S14 S15 S18 S29 S30 S36 S37 S40 S41 S42 S53 S57 S59 S60 S61 S64 S65 S67 S68 S74 S77 S80 S81 S86	40 descripteurs: M0 M1 M2 M3 M4 M5 M6 M7 M8 M9 M10 M11 M12 M13 M14 M16 M17 M18 M19 M21 M23 M24 M25 M26 M27 M29 M30 M31 M32 M34 M35 M36 M37 M38 M49 M51 M52 M53 M60 M61	18 descripteurs: C0 C1 C2 C3 C4 C6 C9 C11 C12 C13 C14 C15 C16 C19 C28 C29 C32 C37

Table 67 : Sélection de descripteurs optimaux réalisés par l'algorithme de sélection automatiques d'attribut pour les méthodes d'analyse spectrale, des coefficients MFCC et de l'analyse cepstrale.

Concernant le premier étage de classification, la sélection automatique d'attributs n'apporte pas une augmentation significative des performances de classification. Cette amélioration est plus marquée pour les deux autres étages de classification : l'augmentation du pourcentage de classification correcte augmente de 0.7 à 5.8 %. Comme précédemment, de meilleures performances sont obtenues en considérant uniquement les paramètres issus de l'analyse MFCC. Excepté pour les deux classes de petites embarcations lentes et de vitesses modérées, les pourcentages de classification correcte sont compris entre 40 et 63 % pour les deux derniers étages de classification. Cependant, cette sélection automatique sur des sous-ensembles présente des résultats moins performants que la sélection automatique réalisée sur l'ensemble des attributs.

1^{er} étage de classification

	P	G
P	70.3	41.7
G	29.7	58.3

2^{ème} étage de classification

	P _L	P _M	P _R	G _P	G _G
P _L	31.5	22.8	15.	15.9	16.6
P _M	21.4	29.3	15.2	13.5	16.3
P _R	15.3	16.6	47.9	9.9	11.6
G _P	15.7	14.4	10.	51.9	10.8
G _G	16.	16.9	11.9	8.8	44.6

3^{ème} étage de classification

	P _L	P _M	P _{RP}	P _{RG}	G _{PP}	G _{PL}	G _{GL}	G _{GR}
P _L	19.6	15.5	8.3	10.8	9.5	10.6	8.8	11.5
P _M	14.9	19.	7.9	11.7	7.6	9.5	9.4	12.8
P _{RP}	10.8	11.3	49.8	10.3	7.5	7.	5.2	7.9
P _{RG}	9.9	10.7	8.2	36.2	4.5	5.7	8.	7.4
G _{PP}	13.3	11.6	8.4	6.6	52.9	8.1	8.1	7.7
G _{PL}	10.8	10.1	7.	7.6	8.4	47.1	7.7	10.3
G _{GL}	10.	10.2	5.	8.6	4.6	5.	43.7	12.3
G _{GR}	10.6	11.5	5.5	8.2	5.	7.	9.	30.2

Nom	Détail	Nom	Détail
P	Petites embarcations	G	Grandes embarcations
P _L	Petites embarcations lentes (v < 7m/s)	G _P	Grandes embarcations de moins de 16 m de longueur
P _M	Petites embarcations de vitesse modérée (7 < v < 13 m/s)	G _{PP}	Grandes embarcations de moins de 16 m de longueur proche (d < 120 m)
P _R	Petites embarcations de rapide (13 m/s < v)	G _{PL}	Grandes embarcations de moins de 16 m de longueur loin (d > 120 m)
P _{RP}	Petites embarcations de rapide de moins de 6 m de longueur	G _G	Grandes embarcations de plus de 16 m de longueur
P _{RG}	Petites embarcations de rapide de plus de 6 m de longueur	G _{GL}	Grandes embarcations de plus de 16 m de longueur lente (v < 7.5 m/s)
		G _{GR}	Grandes embarcations de plus de 16 m de longueur rapide (v > 7.5 m/s)

Table 68 : Matrice de confusion en pourcentage après sélection automatique des descripteurs acoustiques- SPECTRALE

1^{er} étage de classification

	P	G
P	73.6	39.
G	26.4	61.

2^{ème} étage de classification

	P _L	P _M	P _R	G _P	G _G
P _L	35.8	23.9	14.2	13.	16.2
P _M	23.3	35.2	12.8	13.4	16.
P _R	13.9	13.5	54.3	7.3	8.6
G _P	11.4	11.7	7.4	57.9	8.9
G _G	15.6	15.7	11.2	8.4	50.3

3^{ème} étage de classification

	P _L	P _M	P _{RP}	P _{RG}	G _{PP}	G _{PL}	G _{GL}	G _{GR}
P _L	23.7	18.5	7.6	11.2	9.	9.7	9.5	12.4
P _M	17.1	22.7	6.8	10.4	7.3	10.2	8.3	12.6
P _{RP}	10.1	8.9	61.4	6.	3.7	6.9	4.7	7.5
P _{RG}	10.5	10.8	4.3	46.2	3.9	5.4	7.3	5.4
G _{PP}	9.7	9.1	4.4	5.6	63.7	5.1	4.	7.4
G _{PL}	7.9	8.9	5.7	5.2	4.	50.5	5.9	7.4
G _{GL}	10.4	9.1	4.5	9.2	3.1	6.1	52.9	7.3
G _{GR}	10.6	11.9	5.3	6.3	5.2	6.1	7.4	40.

Table 69 : Matrice de confusion en pourcentage après sélection automatique des descripteurs acoustiques – MFCC

1^{er} étage de classification

	P	G
P	66.4	43.7
G	33.6	56.3

2^{ème} étage de classification

	P _L	P _M	P _R	G _P	G _G
P _L	29.9	23.5	17.9	17.7	18.8
P _M	21.8	26.8	16.2	15.4	17.7
P _R	15.7	17.1	43.7	9.4	11.9
G _P	15.6	15.5	10.6	43.1	14.1
G _G	17.	17.1	11.6	14.5	37.6

3^{ème} étage de classification

	P _L	P _M	P _{RP}	P _{RG}	G _{PP}	G _{PL}	G _{GL}	G _{GR}
P _L	19.	15.4	9.3	12.1	10.8	11.3	12.1	12.
P _M	14.9	17.	9.8	11.9	9.3	11.9	10.	12.6
P _{RP}	9.9	11.4	45.4	12.4	5.5	5.5	5.7	8.1
P _{RG}	11.4	11.5	9.9	30.8	6.8	8.	7.9	7.8
G _{PP}	12.1	11.7	6.5	8.1	44.1	9.5	8.6	10.2
G _{PL}	10.2	10.6	6.3	7.5	6.5	35.1	9.9	10.4
G _{GL}	11.9	10.8	6.2	10.2	9.2	9.7	36.6	11.6
G _{GR}	10.5	11.5	6.7	6.9	7.9	8.9	9.	27.3

Table 70 : Matrice de confusion en pourcentage après sélection automatique des descripteurs acoustiques – CEPSTRE

Une reconstitution des deuxièmes premiers étages de classification est réalisée depuis les résultats du 3^{ème} étage de classification issue de la sélection automatique des attributs MFCC. Les résultats obtenus pour le 1^{er} étage de classification sont contrastés : le pourcentage de fausses détections diminue pour les grandes embarcations, mais augmente pour les petites embarcations. Concernant le 2^{ème} étage de classification, une augmentation du pourcentage de classification correcte est observée, exceptée pour les deux classes de petites embarcations lente et vitesse modérée. Ce pourcentage atteint alors 61.7 %. Une modification de la répartition du pourcentage de non détection et de fausses alarmes est à aussi notée. Cette modification se traduit par une uniformisation de ces deux pourcentages entre les classes restantes : l'influence des deux classes de petites embarcations lentes diminue alors.

1 ^{er} étage de classification			2 ^{ème} étage de classification					Nom		Détail	
	P	G		P _L	P _M	P _R	G _P	G _G			
P	62,1	32,0	P _L	23,7	18,5	10,3	9,4	11,2	P	Petites embarcations	
G	37,9	68,0	P _M	17,1	22,7	9,5	8,8	10,8	P _L	Petites embarcations lentes (v < 7m/s)	
			P _R	20,6	19,7	55,7	10,0	12,5	P _M	Petites embarcations de vitesse modérée (7 < v < 13 m/s)	
			G _P	17,6	18,0	10,6	61,7	12,7	P _R	Petites embarcations de rapide (13 m/s < v)	
			G _G	21,0	21,0	14,0	10,3	52,9	G	Grandes embarcations	
									G _P	Grandes embarcations de moins de 16 m de longueur	
									G _G	Grandes embarcations de plus de 16 m de longueur	

Table 71 : Matrices de confusion en pourcentage obtenu après reconstitution des deux premiers étages de classification en se basant sur les résultats du 3^{ème} étage de classification pour la sélection automatique des descripteurs acoustiques MFCC

La sélection des descripteurs acoustiques n'est pas la seule variable d'entrée d'un classificateur, **le choix de la base d'apprentissage** conditionne les résultats de l'algorithme de classification. Les résultats présentés jusqu'à présent correspondent à la moyenne des pourcentages de classification observés pour 1000 bases d'apprentissage. La Figure 112 présente la fonction de densité de probabilité du pourcentage de détections correctes pour 10 000 bases d'apprentissage et en considérant la liste de descripteurs optimale issue de la sélection automatique sur l'ensemble des descripteurs. Ce nombre de bases d'apprentissage bien que conséquent ne représente qu'une infime fraction des combinaisons possibles : $2.4 \cdot 10^{34}$ combinaisons possibles seulement pour la base d'apprentissage liée à la classe la moins nombreuse. Les étoiles correspondent aux valeurs moyennes. Une instabilité est observée en fonction de la base de données d'entrées. Les variations par rapport aux niveaux moyens sont conséquentes et atteignent plus de 20 % pour certaines classes. Ainsi, le pourcentage de détections correctes devient supérieur à 75 % pour 4 classes de bateaux et même supérieur à 90 % pour les grandes embarcations de moins de 16 m passant à moins de 120 m au CPA. En revanche, le pourcentage de détections correctes associés aux petites embarcations de vitesse lente et modérée dépasse à peine 30 % dans une configuration idéale.

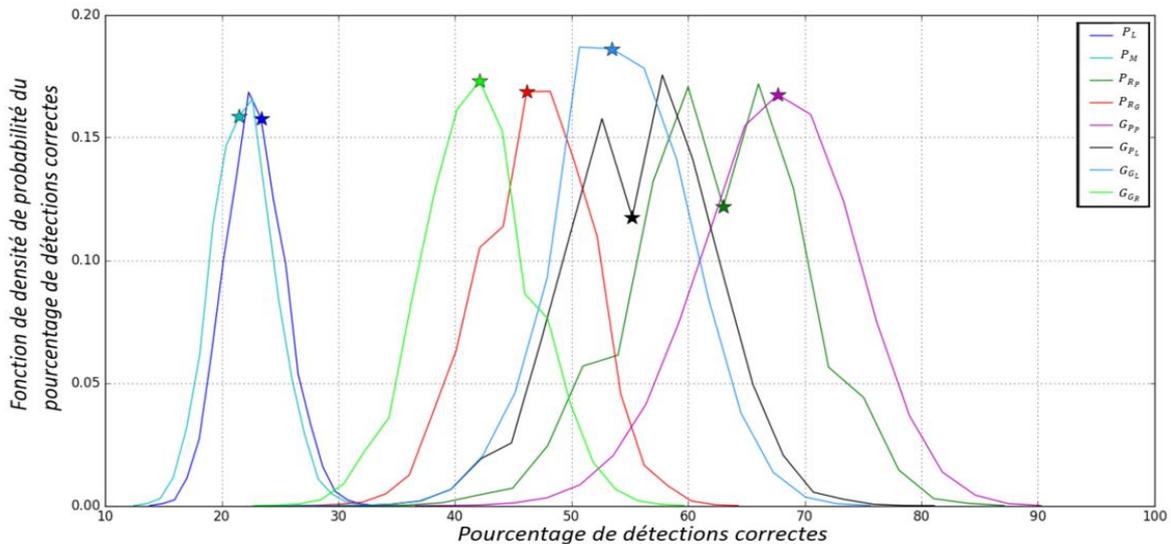


Figure 112 : Fonctions de densité de probabilité du pourcentage de détections correctes pour 100 000 bases d'apprentissage

Ces maximums de pourcentages de détections correctes sont obtenus à partir des bases d'apprentissage différentes et sont difficilement compatibles entre eux. Une **base d'apprentissage optimale** est alors constituée en considérant le sous-ensemble décrivant une classe lorsque cette classe atteint un pourcentage de détections correctes maximum. Cette méthode est toutefois limitée car la distinction entre deux classes n'est pas seulement liée à la capacité à bien décrire une classe mais aussi à la capacité à différencier les classes. La Table 72 présente les matrices de confusion obtenues pour ces bases d'apprentissages optimales. Le pourcentage de détections correctes est inférieur au maximum observé individuellement pour chaque classe, mais présente une forte

amélioration par rapport à la moyenne présentée précédemment. Pour le troisième étage de classification, 3 classes ont une probabilité de détections correctes supérieure à 74 %. Les difficultés liées aux classes de petites embarcations de vitesse lente et modérée persistent.

1^{er} étage de classification

	P	G
P	67.8	23.9
G	32.2	76.1

2^{ème} étage de classification

	P _L	P _M	P _R	G _P	G _G
P _L	34.8	18.8	15.3	8.	13.
P _M	24.3	37.1	10.	8.	11.5
P _R	12.2	15.4	59.8	3.5	9.4
G _P	11.8	12.	5.3	66.2	6.6
G _G	16.9	16.7	9.7	14.4	59.5

3^{ème} étage de classification

	P _L	P _M	P _{RP}	P _{RG}	G _{PP}	G _{PL}	G _{GL}	G _{GR}
P _L	26.4	18.5	5.7	8.9	7.4	4.6	8.1	13.6
P _M	17.1	22.9	6.8	6.	0.9	8.3	6.8	7.6
P _{RP}	7.7	8.7	78.4	3.6	0.	1.9	5.4	4.
P _{RG}	10.6	11.1	1.1	58.9	1.9	2.8	4.7	8.1
G _{PP}	8.8	9.	1.1	1.6	84.3	0.	2.7	6.6
G _{PL}	9.1	8.5	1.1	4.8	0.9	74.1	4.7	5.6
G _{GL}	11.5	12.5	4.5	10.5	2.8	1.9	60.8	7.6
G _{GR}	8.9	8.8	1.1	5.6	1.9	6.5	6.8	47.

Nom	Détail	Nom	Détail
P	Petites embarcations	G	Grandes embarcations
P _L	Petites embarcations lentes ($v < 7$ m/s)	G _P	Grandes embarcations de moins de 16 m de longueur
P _M	Petites embarcations de vitesse modérée ($7 < v < 13$ m/s)	G _{PP}	Grandes embarcations de moins de 16 m de longueur proche ($d < 120$ m)
P _R	Petites embarcations de rapide (13 m/s $< v$)	G _{PL}	Grandes embarcations de moins de 16 m de longueur loin ($d > 120$ m)
P _{RP}	Petites embarcations de rapide de moins de 6 m de longueur	G _G	Grandes embarcations de plus de 16 m de longueur
P _{RG}	Petites embarcations de rapide de plus de 6 m de longueur	G _{GL}	Grandes embarcations de plus de 16 m de longueur lente ($v < 7.5$ m/s)
		G _{GR}	Grandes embarcations de plus de 16 m de longueur rapide ($v > 7.5$ m/s)

Table 72 : Matrice de confusion en pourcentage après sélection automatique des descripteurs acoustiques et la base d'apprentissage optimale pour chaque étage

Une étude des erreurs de détection est réalisée sur la base de données optimale du 3^{ème} étage de classification. Chaque passage de bateaux (60 seconds centrés autour du CPA) a été segmenté en 10 sessions de 10 s. La Figure 114 présente le nombre de sessions associées à un même bateau en fonction de la prédiction réalisée par l'algorithme. Globalement, le nombre de sessions moyen d'un même bateau non détectées et dont la prédiction concerne la même classe est de 1.6 pour les classes peu nombreuses. Des valeurs plus importantes sont toutefois observées : un bateau open-coque à une distance de 120 m et une vitesse de 8.5m/s (classe P_{RP}) possède 9 non-détections dont la prédiction indique la même classe G_{GL}, alors qu'une de ces sessions fait partie de la base d'apprentissage. Pour les deux classes de petites embarcations à vitesse lente et modérée, le nombre moyen de sessions d'un même bateau non détectées et dont la prédiction concerne la même classe augmente et est de 2.6. Pour ces deux classes, 40 bateaux dépassent les 8 sessions et sont confondus à 27.5 % avec l'autre classe de petites embarcations de vitesse lente et modérée et à 30 % avec les petites embarcations rapides et 42% avec les grandes embarcations (dont 25% de plus de 16 m). La comparaison de ces individus avec les éléments caractérisant le bateau ne permet pas d'établir un lien entre eux.

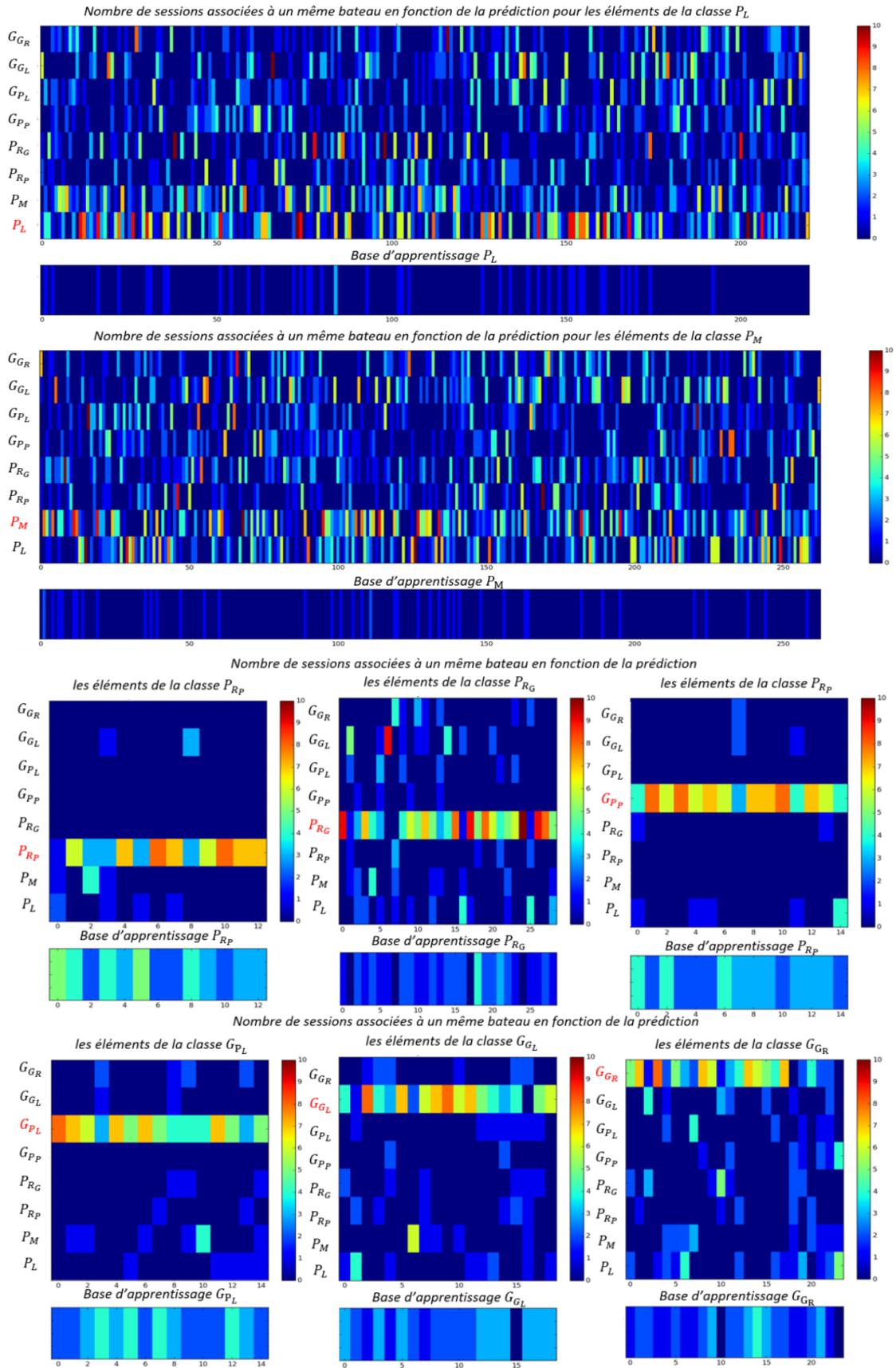


Figure 113 : Nombre de sessions associées à un même bateau en fonction de la prédiction réalisée par l'algorithme de classification

L'erreur de détection semble faiblement liée à des effets liés à l'éloignement par rapport au CPA. En effet, chaque passage de bateau (60 secondes centrées autour du CPA) a été segmenté en 10 sessions de 10 s. La Figure 114 représente le pourcentage de détection par classe et par intervalle de 10 secondes. Les probabilités de détections correctes présentent deux comportements contradictoires. Pour la majorité des classes, de faibles fluctuations par rapport à l'éloignement au CPA sont observées avec de légères meilleures détections à proximité du CPA, exceptées pour les deux classes de petites embarcations de vitesse lente et modérée où la classification semble être meilleure lorsque l'on s'éloigne du CPA. La répartition des non-détections en fonction de l'éloignement par rapport au CPA et des classes précitées ne semble pas présenter de logique particulière ; des éléments singuliers sont toutefois observables dans la Figure 114.

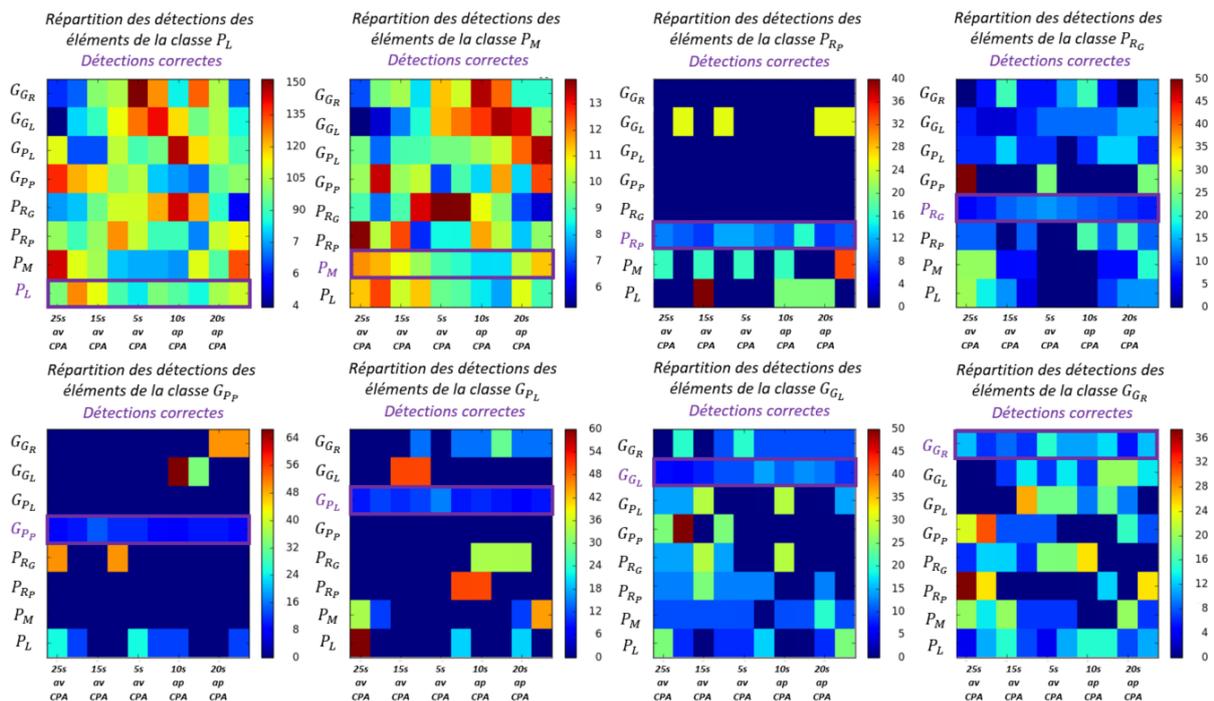
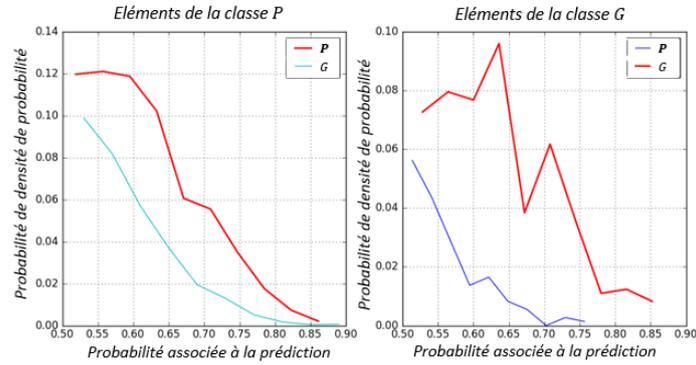


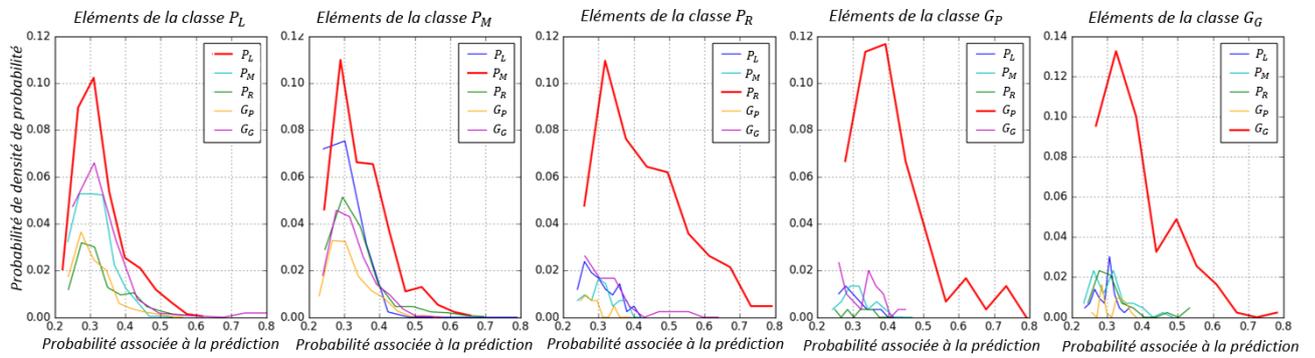
Figure 114 : Pourcentage de détection par classes et par intervalles de 10 secondes

La Figure 115 représente la fonction de densité de probabilité de la probabilité associée à chaque prédiction réalisée par l'algorithme de classification, normalisée en considérant l'ensemble d'une classe. Pour le 1^{er} étage de classification, les fonctions de densité de probabilité des probabilités de prédiction possèdent la même évolution pour les petites embarcations, alors que pour les grandes embarcations, les non-détections possèdent majoritairement des probabilités moins élevées. Pour le troisième étage de classification, les probabilités associées aux non-détections sont principalement inférieures à 0.3. Pour les classes de petites embarcations de vitesse lente et modérée, le nombre de non-détections associées avec une probabilité supérieure à 0.3 reste encore conséquent. En revanche, les fonctions de densité de probabilités associées aux détections correctes (en rouge) possèdent leurs maximums entre 0.2 et 0.3. Ces mêmes caractéristiques se retrouvent pour le deuxième étage de classification où les probabilités associées aux non-détections sont inférieures à 0.4 pour les classes peu nombreuses.

1^{ère} étage de classification :



2^{ème} étage de classification :



3^{ème} étage de classification :

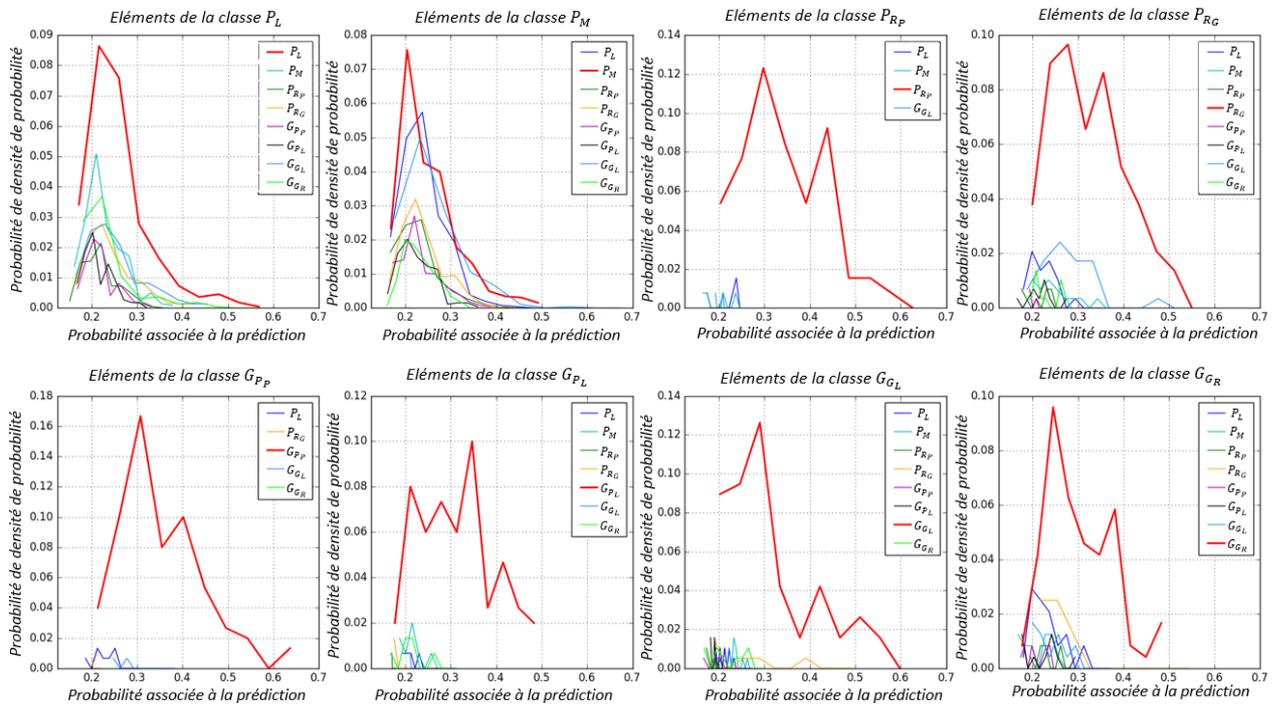


Figure 115 : Fonctions de densité de probabilité de la probabilité associée à chaque prédiction réalisée par l'algorithme de classification, normalisée en considérant l'ensemble d'une classe

Une adaptation de l'algorithme de classification est alors proposée. Avant prédiction, la probabilité estimée par l'algorithme de classification est comparée à un seuil par un seuil. Lorsque la probabilité est inférieure à ce seuil, l'algorithme déclare ne pas pouvoir classer le bateau. Les matrices de confusion sont alors estimées lorsque l'algorithme déclare pouvoir classer le bateau. Plus la valeur du seuil est élevée, plus les probabilités de détections correctes seront importantes ; mais en contrepartie, plus le nombre de bateaux non classifiable par l'algorithme augmentera. Un compromis est obtenu en considérant la valeur seuil de 0.58 pour le 1^{er} étage de classification, 0.34 pour le 2^{ème} étage de classification, 0.23 pour le 3^{ème} étage de classification. La Table 73 présente les matrices de confusion estimées sur les bases de données optimales. Pour le 2^{ème} et 3^{ème} étages de classification, les résultats restent faibles pour les classes correspondant aux petites embarcations de vitesse lente et modérée, mais deviennent corrects pour les autres classes. En contrepartie, le nombre de séquences classées par l'algorithme est faible : entre 30 et 86 % des données.

1 ^{er} étage de classification			2 ^{ème} étage de classification						3 ^{ème} étage de classification								
	P	G		P _L	P _M	P _R	G _P	G _G		P _L	P _M	P _{RP}	P _{RG}	G _{PP}	G _{PL}	G _{GL}	G _{GR}
C	52.6	58.2	C	28.	29.9	48.3	55.2	39.	C	39.9	43.3	76.1	71.	86.1	63.9	58.1	63.6
\bar{C}	47.5	41.2	\bar{C}	72.	70.1	51.7	44.8	61.	\bar{C}	60.1	56.7	23.9	29.	13.9	36.1	41.9	36.4
P	73.2	12.6	P _L	39.1	8.2	6.5	2.7	3.9	P _L	35.3	19.5	4.5	4.5	4.3	1.4	3.5	9.5
G	26.8	87.5	P _M	20.6	51.5	4.5	3.6	6.2	P _M	15.2	25.6	4.5	5.7	0.	2.9	5.8	4.
			P _R	13.6	13.9	81.3	2.7	5.4	P _{RP}	5.6	6.8	91.	1.7	0.	0.	0.	2.4
			G _P	8.7	10.3	1.3	80.2	3.9	P _{RG}	11.5	10.7	0.	70.5	0.	1.4	4.7	7.9
			G _G	18.	16.2	6.5	10.8	80.6	G _{PP}	5.5	7.9	0.	0.6	91.4	0.	1.2	3.2
									G _{PL}	6.	6.8	0.	2.3	1.1	91.3	0.	4.8
									G _{GL}	14.3	15.2	0.	11.4	3.2	0.	80.2	6.3
									G _{GR}	6.5	7.5	0.	3.4	0.	2.9	4.7	61.9

Nom	Détail	Nom	Détail
C	L'algorithme déclare pouvoir classer le bateau	\bar{C}	L'algorithme déclare ne pas pouvoir classer le bateau
P	Petites embarcations	G	Grandes embarcations
P _L	Petites embarcations lentes ($v < 7$ m/s)	G _P	Grandes embarcations de moins de 16 m de longueur
P _M	Petites embarcations de vitesse modérée ($7 < v < 13$ m/s)	G _{PP}	Grandes embarcations de moins de 16 m de longueur proche ($d < 120$ m)
P _R	Petites embarcations de rapide (13 m/s $< v$)	G _{PL}	Grandes embarcations de moins de 16 m de longueur loin ($d > 120$ m)
P _{RP}	Petites embarcations de rapide de moins de 6 m de longueur	G _G	Grandes embarcations de plus de 16 m de longueur
P _{RG}	Petites embarcations de rapide de plus de 6 m de longueur	G _{GL}	Grandes embarcations de plus de 16 m de longueur lente ($v < 7.5$ m/s)
		G _{GR}	Grandes embarcations de plus de 16 m de longueur rapide ($v > 7.5$ m/s)

Table 73 : Matrice de confusion en pourcentage après sélection automatique des descripteurs acoustiques et la base d'apprentissage optimale pour chaque étage

8.4.2 La détection acoustique de bateaux

La détection des passages de bateaux proches est réalisée en utilisant un algorithme de type *Random Forest* et pour quatre sélections de descripteurs acoustiques : l'ensemble des paramètres, les paramètres issus de la sélection manuelle, de la sélection automatique des attributs et de la sélection automatique de MFCC. Pour les différentes sélections des descripteurs acoustiques (manuelle, automatique, automatique MFCC), les descripteurs acoustiques retenus correspondent à ceux sélectionnés pour la classification du 3^{ème} étage de classification. La base d'apprentissage est alors composée de 2953 individus par classe. La Table 74 présente les résultats obtenus. La réduction du nombre d'attributs influence faiblement les résultats des classificateurs.

L'ensemble des descripteurs acoustiques	Sélection manuelle		Sélection automatique sur l'ensemble des attributs		Sélection automatique sur les attributs MFCC	
	B	\bar{B}	B	\bar{B}	B	\bar{B}
B	98.8	1	98.7	1.5	98.6	1.5
\bar{B}	1.2	99	1.3	98.5	1.4	98.5

Table 74 : Matrices de confusion en pourcentage pour la détection de bateau avec B la classe présence d'un bateau et \bar{B} la classe absence de bateaux

Le pourcentage de fausses détections est compris entre 1 et 2.4 %. 92 % des sessions concernées correspondent à des séquences de bateaux au loin (avec ou sans présence d'activité biologique) et 5 % correspondent à des sessions de fortes activités acoustiques dues au chorus de poissons. Le pourcentage de non-détections est d'environ 1.2 %. Chaque passage de bateaux (60 secondes centrées autour du CPA) a été segmenté en 10 sessions de 10 s. Le pourcentage de non-détections augmente lors de l'éloignement temporel par rapport du passage au CPA. En effet, plus de la moitié (53.2%) des non-détections sont observées dans les deux intervalles les plus éloignés du CPA (Table 75) et plus des trois-quarts (78.1%) des non-détections lorsque l'on considère les 4 intervalles les plus extrêmes. Ces non-détections correspondent alors au passage d'embarcations très rapides dont l'énergie est uniquement présente à moins de 15 secondes avant et après le passage au CPA. Cette observation montre que l'erreur de non-détection semble davantage liée à la méthode d'annotation et non à la méthode de classification. Le pourcentage total de non-détections à moins de 15 secondes du passage au CPA est alors de **0.26%**.

	25s av CPA	20s av CPA	15s av CPA	10 s av CPA	5s av CPA	5s ap CPA	10s ap CPA	15s ap CPA	20s ap CPA	25s ap CPA
Pourcentage parmi les non détections	19.8 %	11.1%	6.3%	3.5%	2.3%	1.1%	3.2%	5.5%	13.8%	33.4%

Table 75 : Pourcentage d'apparition des non détection en fonction de la durée par rapport au CPA

8.4.3 La détection acoustique des bateaux au loin parmi la catégorie *absence de bateau*

L'utilisation des paramètres dédiés à la classification des bateaux permet également de détecter la présence de bateaux au loin parmi les bruits « autres » non associés à un bateau proche. Ces bruits « autres » sont classés en 7 catégories présentées dans la Table 76. Une différenciation est effectuée pour les bruits de poissons en fonction de la densité des émissions. La base d'apprentissage est fixée à 300 individus pour chaque catégorie.

Nom	Détail	Nb de séquences
P_{Ha}	Fort bruit uniforme du chorus de poissons (forte densité d'émissions)	1300
P_{Ma}	Bruit de poisson (densité moyenne d'émissions)	1000
P_{La}	Bruit de poisson individuel (densité faible d'émissions)	2190
B_{lp}	Bruit de bateaux au loin avec émissions de poisson	1160
B_l	Bruit de bateaux au loin sans émission de poisson	1540
B	Bruit benthique	2210
M	Bruit de pluie	1130

Table 76 : Présentation des classes acoustiques des bruits non attribuée aux passages de bateaux

La réunion de deux classes associées aux bruits de bateaux permet de détecter la présence de bateaux au loin (indépendamment de l'activité biologique). La Table 77 présente les matrices de confusion issues de la classification précédente mais en réunissant les classes pour former deux catégories : bateaux au loin B_l ou pas de bateau au loin \bar{B}_l . Ces matrices sont obtenues en considérant l'ensemble des paramètres, les paramètres issus de la sélection manuelle, de la sélection automatique des attributs et de la sélection automatique de MFCC. Comme précédemment, les différentes sélections des descripteurs acoustiques (manuelle, automatique, automatique MFCC) font référence aux descripteurs acoustiques retenus pour la classification du 3^{ème} étage de classification. Les pourcentages de non-détections des bateaux au loin sont compris entre 5 et 7 % et les pourcentages de fausses alarmes sont compris entre 2.8 et 3.1 %.

L'ensemble des descripteurs acoustiques			Sélection manuelle			Sélection automatique sur l'ensemble des attributs			Sélection automatique sur les attributs MFCC		
	B_l	\bar{B}_l		B_l	\bar{B}_l		B_l	\bar{B}_l		B_l	\bar{B}_l
B_l	94,7	3,0	B_l	93,0	3,1	B_l	94.2	2.7	B_l	94,8	2,8
\bar{B}_l	5,3	97,0	\bar{B}_l	7,0	96,9	\bar{B}_l	5.8	97.3	\bar{B}_l	5,2	97,2

Table 77 : Matrices de confusion en pourcentage de la détection d'un bateau au loin non attribuée au passage de bateaux pour les 4 ensembles d'attributs

L'origine des fausses-détections et non-détections est identifiable lors de l'analyse des matrices de confusion obtenues pour l'ensemble des classes de bruits « autres » (Table 78). Les erreurs de classification entre les deux catégories associées aux bruits de bateaux représentent les valeurs maximales de non détection et fausse-détections observées en atteignant 11 % (en bleu). Les erreurs de classification entre les deux catégories associées aux bruits de bateaux représentent les valeurs maximales de non-détections et fausses-détections observées en atteignant 11 % (en bleu). La présence des émissions individuelles de poissons superposées au bruit de bateau accroît :

- Les fausses détections avec :
 - Les catégories de bruit de poisson seul à forte et moyenne densité d'émissions : une fausse détection de 2.6 à 4.7 % est observée (en organe) contre 0 à 0.6 % lorsque seul le bruit de bateaux au loin est présent.
 - La catégorie de bruit benthique : une fausse détection de 2.8 à 3 % est observée (en violet) contre 0.4 à 0.7 % lorsque seul le bruit de bateaux au loin est présent.
- Les non-détections avec la catégorie de bruit benthique : un pourcentage de non-détections entre 5.3 % à 6.1 % est observé (en vert) contre 1.2% à 1.6 % en l'absence d'émissions de poissons.

L'ensemble des descripteurs acoustiques								Sélection manuelle des descripteurs acoustiques							
	P_{Hd}	P_{Md}	P_{Ld}	B_{lp}	B_l	B	M		P_{Hd}	P_{Md}	P_{Ld}	B_{lp}	B_l	B	M
P_{Hd}	95.6	3.8	0.	0.4	0.1	0.	0.	P_{Hd}	94.3	4.1	0.2	0.6	0.4	0.1	0.
P_{Md}	4.2	89.6	1.8	1.5	0.1	0.5	0.	P_{Md}	4.8	87.1	2.6	2.7	0.3	0.5	0.
P_{Ld}	0.	2.6	86.2	2.1	0.1	6.	0.	P_{Ld}	0.	4.2	84.6	3.	0.6	6.9	0.2
B_{lp}	0.2	2.9	4.7	79.7	10.5	3.	0.2	B_{lp}	0.6	3.2	4.2	77.8	10.4	3.	0.3
B_l	0.	0.	0.3	10.1	87.6	0.4	0.7	B_l	0.3	0.1	0.2	9.7	86.4	0.6	0.8
B	0.	1.2	7.	6.1	1.6	87.6	1.9	B	0.	1.3	7.7	5.5	1.4	86.4	2.1
M	0.	0.	0.1	0.1	0.	2.4	97.1	M	0.	0.	0.4	0.8	0.6	2.6	96.6

Sélection automatique sur l'ensemble des descripteurs acoustiques								Sélection automatique des descripteurs acoustiques de l'analyse MFCC							
	P_{Hd}	P_{Md}	P_{Ld}	B_{lp}	B_l	B	M		P_{Hd}	P_{Md}	P_{Ld}	B_{lp}	B_l	B	M
P_{Hd}	95,5	3,2	0,4	0,7	0,2	0	0	P_{Hd}	96.4	3.6	0.4	0.4	0.2	0.	0.
P_{Md}	4,2	90,6	2,1	1,8	0	0,4	0	P_{Md}	3.3	89.2	2.4	1.7	0.1	0.5	0.
P_{Ld}	0,1	2,3	86,2	2,5	0,4	6,7	0	P_{Ld}	0.2	3.5	86.	2.4	0.2	7.3	0.
B_{lp}	0,2	2,8	3,7	79,2	9,3	2,9	0,1	B_{lp}	0.	2.6	4.	78.	8.4	2.8	0.1
B_l	0	0	0,2	9,8	88,5	0,7	0,8	B_l	0.	0.	0.6	11.5	90.	0.6	0.8
B	0	1,1	6,8	5,3	1,2	86,8	1,9	B	0.	1.1	6.6	5.6	1.2	86.5	1.9
M	0	0	0,5	0,8	0,4	2,5	97,2	M	0.	0.	0.	0.3	0.	2.3	97.2

Table 78 : Matrices de confusion en pourcentage de la classification des bruits non attribuée au passage de bateaux pour les 4 ensembles d'attributs : l'ensemble des attributs (en haut – gauche), pour la sélection manuelle d'attribut (en haut – à droite), pour la sélection automatique sur l'ensemble des paramètres (en bas – à gauche) et pour la sélection automatique sur les paramètres MFCC (en bas – à droite)

8.5 Discussion

8.5.1 Une difficulté de classification induite par les deux classes nombreuses

Les résultats de l'étude de classification montrent que la principale difficulté lors de la classification est liée à la présence des deux classes de petites embarcations peu rapides. Cette difficulté se traduit par un faible pourcentage de détection correct et un pourcentage de fausse détection élevé parmi les autres classes. De même, les algorithmes de classification montrent des difficultés à différencier les individus de ces deux classes. Ces deux classes présentent un nombre d'individus élevé en comparaison aux autres classes, ainsi qu'une forte diversité. Les contraintes induites par le choix de la base d'apprentissage créent alors un sous-apprentissage de cette classe. L'étude réalisée dans le chapitre 7 n'a pas montré de forte dépendance entre les descripteurs acoustiques et un paramètre physique du bateau. La nécessité de créer des sous-embranchements s'impose toutefois afin de réduire la diversité présente dans cette classe. La solution envisagée sera alors un regroupement de ces deux classes suivi d'une séparation en 3 à 4 classes « acoustiques » caractérisant la diversité observée chez les petites embarcations. La méthode proposée pour la création de ces classes acoustiques est l'utilisation d'un algorithme de classification non supervisée tels que l'algorithme des k-mean estimé sur l'ensemble des paramètres et sur les sélections optimale et efficace.

8.5.2 Performance de l'algorithme

Les performances de l'algorithme ont été uniquement qualifiées en termes de pourcentage de détections correctes et de fausses alarmes. L'aspect robustesse de la classification vis-à-vis d'un mélange de signature acoustique, ainsi les distances de détection n'ont pu être étudiées. En ce qui concerne les distances des détections, des premiers éléments peuvent être cependant être apportés. Les pourcentages de non détection à moins de 30 seconds du CPA sont faibles. Des bateaux à 12 m/s passant à 250 m de l'enregistreur étant détectés, la distance de détection est supérieure à 438 m. Une estimation plus précise de la distance de détection peut être réalisée par annotation de la position maximale sur l'image GoPro® obtenue en limite de détection / classification par l'algorithme.

8.5.3 Adaptation pour un auto-apprentissage

Une adaptation visant à un auto-apprentissage de l'algorithme peut être envisagée pour pallier aux erreurs de classification. Lorsque l'algorithme déclare ne pas savoir classer un bateau, l'avis d'un expert est demandé. Le résultat est alors ajouté à la base d'apprentissage et un nouvel entraînement est réalisé. Dans un premier temps, il est possible de tester ce mode de fonctionnement sur ces mêmes données et d'observer le nombre de séquences à ajouter dans la base d'apprentissage pour limiter les non détections et le nombre de données « non-classées ».

8.5.4 Adaptation pour des systèmes embarqués

Une adaptation vers les systèmes embarqués est aisément envisageable. L'estimation des MFCC correspondant à des fonctions simples (convolution, multiplication) pouvant être facilement implémenté sur des systèmes embarqués. Cette méthode est peu consommatrice en termes de mémoire vive. La phase d'apprentissage de l'algorithme peut alors être réalisée sur un PC, ainsi que la fusion des différents arbres des forêts de décision. La fusion des arbres de décision reste toutefois une étape délicate. Une fois l'arbre d'apprentissage réalisé, son implémentation sur système embarqué est réalisée à l'aide de fonction conditionnelle.

8.5.5 La possibilité de classer les bruits biologiques

Les résultats de la détection des bateaux au loin parmi les bruits « autres » montre la possibilité de classer le bruit ambiant avec les descripteurs spécifiquement sélectionnés pour la classification des bateaux. Le pourcentage de classification correcte est alors compris entre 77 % et 97 %. Ces pourcentages sont plus importants lorsque l'on considère la sélection automatique réalisée sur les

MFCC. La classification des bruits associés à une forte pluie maximise le pourcentage de détection correcte (supérieure à 95 %). Des pourcentages de fausse détection compris entre 0 et 4.8 % sont observés entre les trois catégories correspondant aux émissions de poissons. La différenciation entre un bruit uniquement benthique et avec présence d'émissions individuelles de poissons se complique pour ces sélections de paramètres : des pourcentages de fausses détections comprises entre 6 à 7.7 %.

8.6 Conclusion

Ce chapitre est focalisé sur les classifications acoustiques des embarcations présentes dans une flottille côtière. Cette classification est réalisée en utilisant trois algorithmes de classification supervisée : un *Random Forest* (à 100 arbres de décision), un SVM (à noyau *Radial Basis Function* et en appliquant un schéma 'ovo') et un réseau de neurones (perceptron à 100 couches cachées). En raison des fortes disparités concernant le nombre de bateaux par classe, une adaptation de la base de données d'apprentissages est réalisée. Cette base de données est composée d'un nombre fixe d'individus par classe correspondant à 1/3 du nombre d'individus de la plus petite classe. Chaque classification est réalisée en considérant 100 tirages aléatoires de la base d'apprentissage.

La classification réalisée sur l'ensemble des paramètres acoustiques présente des résultats mitigés : le pourcentage de détections correctes est plus important que le pourcentage de fausses détections individuelles de chaque classe. Toutefois, ce pourcentage reste inférieur à 50 % pour le 2^{ème} et le 3^{ème} étage de classification. Les trois algorithmes présentent des résultats similaires, l'algorithme *Random Forest* se distingue faiblement des deux autres algorithmes pour le 2^{ème} et le 3^{ème} étage de classification. Plusieurs méthodes de réduction de paramètres ont été mises en place. L'utilisation des vecteurs propres de l'ACP détériore les performances des classificateurs. Deux méthodes de sélections d'attributs ont été mises en place : une sélection manuelle (issue de l'étude réalisée lors de la création de l'arborescence de classification) et une sélection automatique par suppression de l'attribut de plus faible poids. Les résultats obtenus avec ces deux sélections présentent les meilleures performances en comparaison à ceux obtenus en considérant l'ensemble des descripteurs acoustiques. Cependant, le pourcentage de classification correcte ne dépasse pas les 60 %. La sélection des paramètres issus d'une seule méthode d'analyse montre des résultats semblables à ceux observés pour l'ensemble des descripteurs pour les méthodes spectrale, cepstrale et des coefficients MFCC. Une forte dépendance à la base d'apprentissage est remarquée, mais peu de dépendance vis-à-vis des phénomènes de propagation. Les difficultés de classification semblent induites par la présence des deux classes présentant un grand nombre d'individus et une grande diversité. Une adaptation de l'algorithme de classification basée sur la création d'une classe « *non classé* » et d'un seuillage de la probabilité de prédiction a été mise en place. Cette adaptation permet une classification plus certaine traduit par une augmentation de la probabilité de détection correcte alors comprise entre 61 et 91 %. En contrepartie, l'algorithme n'arrive qu'à classer que la moitié de la base de données.

Les différentes sélections de descripteurs acoustiques dédiées à la classification des bateaux permettent également la détection de bateaux et la détection de bateaux au loin, avec de bonnes performances : le pourcentage de fausse alarme et de non détection est inférieur à 1.5 % en détection et inférieur à 7 % en détection de bateau au loin.

Conclusions, perceptives et ouverture

Conclusions

Ces travaux s'inscrivent dans le cadre du monitoring par acoustique passive. Suite au développement de l'activité humaine tel que l'intensification du trafic maritime et le développement de zones portuaires, l'océan subit une altération de son paysage acoustique. La pression subie par les écosystèmes sous-marins s'accroît, se traduit pour les différents organismes par différents niveaux de stress pouvant engendrer des conséquences létales. Un besoin de connaissance et de surveillance des écosystèmes sous-marins a alors été mis en avant par différents programmes et organismes tels que la *Directive Cadre sur la Stratégie du Milieu Marin* (DCSMM). Le principal contributeur anthropique des bruits sous-marins est le trafic maritime. Depuis les années 1970, l'augmentation du trafic maritime hauturier a provoqué dans certaines zones, une augmentation du bruit ambiant de plus de 10 dB. Les bruits rayonnés par les bateaux sont sources de différents questionnements à l'échelle individuelle d'un navire ou à l'échelle globale du trafic, intervenant dans des domaines variés allant de la biologie marine aux applications militaires. Ces questionnements peuvent être regroupés à travers différentes thématiques présentées dans le **chapitre 1**. Les travaux présentés dans ce manuscrit apportent des réponses concernant la caractérisation du bruit rayonné lié au trafic maritime et du bruit rayonné à l'échelle individuelle, son intégration dans le paysage acoustique ainsi que la détection et la classification automatique des entités.

Le travail de recherche présenté dans ce manuscrit avait deux objectifs principaux : la caractérisation du bruit rayonné par le trafic maritime dans le paysage acoustique d'un environnement côtier et la proposition d'algorithmes de traitement du signal adaptés à la détection et classification de sources sonores. Le commerce hauturier attire de très nombreux regards parmi la communauté d'acoustique sous-marine sur les sujets de caractérisation individuelle et classification automatique. Le choix d'une étude des bruits rayonnés sur de très petites embarcations dans un contexte côtier est l'un des défis majeurs de ces travaux.

Mon travail est illustré sur le trafic maritime présent dans la baie de Calvi. Une présentation des enjeux liés à cette baie et de la composition de la flottille récréative et de plaisance est réalisée dans le **chapitre 2**. Une expérimentation permettant le suivi conjoint acoustique et visuel a été spécifiquement réalisée pour ces travaux. Le traitement de ces données a permis la création de 5 bases de données permettant d'aborder les questions liées au trafic maritime sous différents angles.

En raison du faible nombre de bateaux équipés d'un AIS (seulement 3,7% des bateaux traversant la baie), la recherche d'une autre méthode permettant d'identifier le trafic en zone côtière s'est imposée. Ainsi, dans le **chapitre 3** est présenté un algorithme de traitement d'images permettant de détecter et de localiser le trafic dans la baie. Les photographies ayant été prises par une caméra grand-angle GoPro®, elles sont sujettes à des déformations. L'algorithme proposé s'inspire de méthodes de détection de mouvement et de correction de photographies présentes dans la communauté de traitement d'images. Les méthodes retenues allient rapidité, simplicité de mise en œuvre et procurent de bonnes performances. L'estimation des distorsions de la caméra et du géoréférencement sont obtenues empiriquement. Cet algorithme a permis de créer des cartes du trafic maritime en accord avec les observations réalisées sur le terrain. Ces cartes permettent alors de localiser les deux positions des enregistrements par rapport au trafic maritime, mais aussi de localiser les zones de mouillage. Une attention particulière a été consacrée à l'étude des performances de cette méthode. Cette étude est réalisée par une approche théorique et expérimentale (comparaison avec les coordonnées GPS d'un bateau). Des écarts de localisation sont à noter suite au faible nombre d'amers, leurs répartitions dans la baie et aux variations de position de la caméra. Ces écarts ont un impact négligeable sur l'estimation

des niveaux sonores sources. Un protocole d'installation et de calibration de la caméra, testé sur une des sessions d'enregistrement, est proposé.

L'étude acoustique des bruits rayonnés par les bateaux peut être divisée en deux parties. Dans un premier temps, cette source anthropique est considérée d'un point de vue global à l'échelle du trafic maritime. L'objectif est de réaliser une caractérisation du bruit induit par le trafic maritime à travers des descripteurs acoustiques (chapitre 4) et d'évaluer la contribution de ce bruit anthropique dans le paysage acoustique (chapitre 5). Dans un second temps, les bruits rayonnés par les bateaux sont considérés de manière individuelle. La caractérisation par classes acoustiques (chapitre 6,7) et la mise au point d'algorithme de détection / classification par apprentissage supervisée (chapitre 8) sont alors abordés.

Le **chapitre 4** présente les résultats d'une étude sur la caractérisation du bruit rayonné par les bateaux dans le paysage acoustique à l'aide de deux descripteurs acoustiques dans la baie de Calvi. Ces descripteurs traduisent des informations sur le trafic maritime et renseignent dans un disque de 500 m de rayon autour du point d'écoute. Le descripteur sur une durée d'écoute courte, le SPL, caractérise les individualités et est lié au logarithme en base dix de la distance du bateau le plus proche, alors que le descripteur sur une durée d'écoute longue, l'ANL, efface ces individualités et est lié au logarithme en base dix du nombre de bateaux à proximité du point d'écoute. L'étude du lien entre les descripteurs acoustiques et les indicateurs du trafic maritime montre un fort effet lié à la bathymétrie du site et aux conditions météorologiques en fonction de la bande de fréquence ciblée. La variabilité des sources acoustiques est très marquée lors de l'étude du descripteur SPL. Un modèle simple d'estimation du niveau ANL est proposé.

Un suivi spatio-temporel de ces descripteurs acoustiques est réalisé dans le **chapitre 5** dans l'objectif de caractériser la contribution du trafic maritime dans le paysage acoustique de la baie. Un ensemble de critères d'analyse issus de la littérature de suivi acoustique des paysages acoustiques est proposé. Cette analyse est composée de trois études : une étude du paysage acoustique durant l'été au plus proche du trafic maritime, une étude durant l'été à deux positions différentes et une étude à une position loin du trafic sur 3 mois différents. Différentes variations ont alors été analysées : les variations diurne / nocturne, journalières, saisonnières et spatiales. L'alternance diurne / nocturne est principalement marquée par l'activité sonore benthique et ichtyologique (principal contributeur des dépassements de plus de 3 dB). L'augmentation du trafic maritime diurne tend à réduire ces différences. Au plus proche du trafic maritime durant la saison estivale, l'évolution des descripteurs acoustiques reflète le rythme des plaisanciers. Un dépassement de plus de 5 dB est à noter durant moins de 17 % des jours. Lors de l'éloignement physique par rapport au trafic maritime ou temporel, le rythme des plaisanciers s'efface et les niveaux acoustiques diminuent.

Outre la présentation des résultats dans la baie de Calvi, la combinaison de ces deux chapitres permet de spécifier un protocole de sélection des descripteurs acoustiques pour le suivi des zones côtières combinant deux étapes : une analyse des bruits rayonnés par corrélation des données acoustiques aux informations sur le trafic maritime et aux données météorologiques, suivie d'une étude spatio-temporelle de ces descripteurs présélectionnés. La forte variabilité spatiale observée durant la saison estivale montre que le suivi acoustique des bruits liés au trafic de plaisance ne peut être réalisé en un seul point de mesure.

Le **chapitre 6** met en lumière la forte diversité acoustique présente chez les petites embarcations à travers l'étude dans le domaine spectrale, cepstrale, l'analyse DEMON et des coefficients MFCC. Le potentiel de l'analyse DEMON, en termes d'identification des caractéristiques de propulsion, est difficilement automatisable pour ce type de bateaux. Des éléments discriminants entre les catégories de bateaux apparaissent toutefois : la présence d'harmoniques dans le spectre et l'analyse DEMON, la caractérisation de la bosse de bruit spectrale ou de l'amortissement des coefficients MFCC, la présence d'une rupture spectrale dans le cepstre. Ces éléments permettent de la réalisation d'une première esquisse sur la classification des embarcations d'une flottille côtière. Cette classification semble principalement guidée par une séparation petites/grandes embarcations.

383 descripteurs acoustiques répartis en huit méthodes d'analyses sont présentés dans le **chapitre 7**. Ces descripteurs permettent de caractériser une distribution, de la modéliser et d'extraire les éléments discriminants présentés dans le chapitre 6. Deux algorithmes ont été spécifiquement mis en place : un algorithme d'identification automatique de la fréquence fondamentale et un algorithme de détection de rupture spectrale. La visualisation de ces descripteurs dans un espace de dimension réduit permet difficilement d'isoler des classes de bateaux. Des éléments notables sont toutefois observés : les bateaux équipés de moteurs hors-bords sont plus éloignés du barycentre du nuage, un regroupement des individus de plus forte longueur, les plus distants ou les plus rapides est observé. Les plus forts liens entre les descripteurs acoustiques et les paramètres descriptifs du bateau sont observés pour la distance au CPA et la vitesse du bateau. Une arborescence de classification de la flottille d'embarcation côtière composée de trois étages de classification est présentée.

De bonnes performances de détection des bateaux et de détection des bateaux au loin parmi les bruits « autres » sont observées, avec un pourcentage de fausse et non détection inférieur à 1.5 % et à 7 % pour les bateaux au loin. La forte diversité présente chez les petites embarcations se répercute lors de la création de l'arborescence de classification. Ces classes représentent 80.7 % de la base de données. Ainsi, une forte hétérogénéité dans le nombre d'éléments par classe est observée. Cette diversité nuit alors à la classification des embarcations dans le **chapitre 8**. Ainsi, les résultats des algorithmes de classifications supervisés présentent des résultats mitigés : le pourcentage de détection correcte est plus important que le pourcentage de fausse détection individuelle de chaque classe. La réduction du nombre de descripteurs améliore ce résultat, mais ne permet pas d'obtenir une classification robuste des bateaux : le pourcentage moyen de détections correctes ne dépasse pas 60 % pour le 2^{ème} et le 3^{ème} étage de classification. Deux sélections de descripteurs optimaux et efficaces sont alors présentées. Une forte dépendance vis-à-vis de la base d'apprentissage est remarquée, en considérant la base de données optimale, les pourcentages de détections correctes atteignent entre 50 % et 84 %. Une adaptation de l'algorithme de classification basée sur la création d'une classe « *non classé* » et d'un seuillage de la probabilité de prédiction a été mise en place. Cette adaptation permet une classification plus certaine traduit par une augmentation de la probabilité de détection correcte alors comprise entre 61 et 91 %. En contrepartie, l'algorithme n'arrive à classer que la moitié de la base de données.

Perspectives

La détection et la localisation de bateaux par traitement d'images

L'algorithme de détection de bateaux repose sur une détection de mouvement sur l'image avec élimination des pixels isolés. Ainsi l'ensemble du sillage du bateau est détecté. Souhaitant tracer les cartes du trafic maritime long terme, l'utilisation du sillage détecté permet un suivi simple de trajectoire sans utilisation d'algorithme de suivi de piste. Dans le cas présent aucune information ne permet de relier un même bateau entre les différentes détections. En revanche la persistance dans le temps du sillage pour les bateaux allant à forte vitesse augmente artificiellement le nombre de détections. De plus, la présence d'un deuxième bateau dans le sillage du premier est un cas souvent observé.

Un premier axe d'amélioration de l'algorithme aborde ce point. Une élimination simple du sillage persistant peut être réalisée en effectuant une étude sur plusieurs détections consécutives. De plus, une analyse de la texture de l'image dans la zone détectée est envisagée pour permettre l'identification entre bateau et sillage.

Après suppression du sillage, une évolution naturelle de l'algorithme serait de réaliser un suivi visuel de bateaux intégrant ainsi des relations entre les images de détections consécutives. La position précise du bateau peut être caractérisée en utilisant le barycentre du squelette morphologique. Des algorithmes de suivi de pistes permettent de regrouper et d'interpoler les positions correspondant au même bateau.

Parallèlement, l'étude des résultats de la détection de mouvement a montré la possibilité d'identifier le type de bateau en grandes catégories : voilier avec voile, navette touristique, yacht, petites embarcations. Cette distinction est aisément visible lors de l'affichage du squelette morphologique de la zone de détection. Une classification visuelle des bateaux en ces quatre catégories est envisageable. Comme dans le cas de la classification par acoustique, cette classification visuelle peut être réalisée par un algorithme de classification par apprentissage supervisé utilisant des paramètres quantifiant le nombre de pixels détectés et caractérisant la forme du squelette morphologique.

L'étude du bruit rayonné par le trafic maritime

La principale limite des études présentées dans les chapitres 4 et 5 est expérimentale. Les analyses du chapitre 4 ont été réalisées en un seul point de mesure de la même baie et les enregistrements de l'analyse spatiale du chapitre 5 ont été réalisés à des périodes différentes. Pour confirmer ces études, des expérimentations terrain seraient à réaliser dans plusieurs baies avec une acquisition conjointe acoustique (en 2 positions au minimum dans la baie, éloigné et proche du trafic maritime) et visuelle.

D'un point de vue algorithmique, le chapitre 4 présente les résultats en considérant une seule bande large et un seul temps d'intégration. Ce travail a aussi été réalisé en considérant un temps d'intégration de 20s pour le SPL et la bande de fréquence 1.5 kHz à 30 kHz. Les résultats étaient similaires aux résultats présentés. Un travail complémentaire peut cependant être réalisé pour étudier l'influence du temps d'intégration et du choix des bandes de fréquence.

Les conclusions du chapitre 5 interrogent alors sur l'utilisation d'indicateurs caractérisés par un niveau acoustiques pour le suivi environnemental des activités anthropiques. La variabilité spatio-temporelle de l'activité biologique se répercute sur des indicateurs liés à un niveau. Le chapitre 7 a mis en évidence des descripteurs de la forme du signal ayant une corrélation aussi forte que les niveaux SPL avec la distance des bateaux. Un suivi spatio-temporel de ces indicateurs est à réaliser pour statuer sur leurs variabilités en fonction de l'activité biologique.

La détection et la classification par un algorithme de classification supervisée

Différentes perspectives pour l'algorithme de détection et de classification des bateaux par apprentissages supervisés sont envisagées et présentées ci-dessous, classées par thématiques :

- Amélioration des performances de classification :
 - La création de classes acoustiques par un algorithme d'apprentissage non supervisé au sein des petites embarcations non lentes et de vitesses modérées.
 - L'étude croisée des erreurs de localisation des différents étages de classification pour observer si l'analyse conjointe des résultats pour les 3 étages de classification permet une amélioration des performances.
 - L'intégration d'une dimension temporelle, présente en traitement de parole, où l'évolution de descripteurs est observée.
 - L'utilisation d'algorithmes d'apprentissage semi-supervisé : la combinaison de données « étiquetées » à des données « non étiquetées », permet d'améliorer significativement la qualité de l'apprentissage et de réduire les erreurs d'annotation dues à l'intervention d'un expert.
- L'implémentation :
 - La fusion des fonctions de détection et de classification : ces algorithmes ont été testés séparément sur des sélections de données.
 - Une implémentation temps-réel et la validation des résultats par comparaison avec les images GoPro® recueillies dans la baie. Cette implémentation pouvant fonctionner :
 - Par analyse de 10 secondes indépendantes.
 - En considérant un suivi temporel.
 - L'adaptation de l'algorithme de classification qui lorsque qu'il déclare ne pas savoir classer un bateau demande l'avis d'un expert et ajoute automatiquement les résultats à la base d'apprentissage.
 - Une implémentation sur systèmes embarqués.
- L'ajout de fonctionnalité :
 - L'intégration de la classification des sources biologiques et météorologiques réalisable en considérant la sélection de descripteurs actuels et la recherche de descripteurs dédiés à la classification de ce type de sources.
- La caractérisation des performances :
 - L'estimation des distances de détection et de classification. Cet aspect peut être réalisé par annotation de la position maximale obtenue en limite de détection / classification par l'algorithme.
 - L'étude des résultats de classification en présence d'un mélange de signatures acoustiques.

Ouverture

L'étude des bruits rayonnés par les bateaux est un thème vaste abordé selon différents axes dans ce manuscrit. Un regard différent sur les bases de données et les travaux présentés permet d'apporter des éléments de réponse à d'autres questionnements : l'impact du trafic maritime sur la vie aquatique et la modélisation du trafic maritime côtier. Cette section regroupe les premiers éléments de réponse et pistes de recherche pour ces deux thématiques.

L'étude d'impact sur la vie aquatique

Le chapitre 2 présente les différentes espèces présentes dans la baie de Calvi : présence occasionnelle de grand dauphin *Tursiops truncatus* et la présence fort marquée de nombreuses espèces de poissons. Le grand dauphin est classé dans les cétacés « moyennes fréquences ». Le seuil correspondant à des pertes temporaires de l'audition est alors de 215 dB re 1 μ Pa SPL pic et 215 dB re 1 μ Pa².s SEL [Southall_2007]. Pour ce mammifère marin, [Buckstaff_2004] observe une réponse comportementale à partir de 120 dB re 1 μ Pa SPL. Parmi les espèces de poissons présentes dans la baie, les audiogrammes de *Sciaena umbra*, *Chromis chromis*, *Nerophis ophidion* sont présents dans la littérature [Wysocki_2009].

D'un point de vue acoustique, [Magnier_2016a] constate un faible impact du trafic maritime pour l'enregistrement à proximité de la STARESO. Pour 190 passages de bateaux, les niveaux SEL M-weighting reçus pour le grand dauphin sont compris entre 110.2 and 142.5 dB re 1 μ Pa².s et les niveaux dBht reçus par *Sciaena umbra* sont compris entre 55.2 dBht et 69.1 dBht.

D'un point de vue retour terrain, les plongeurs scientifiques et les biologistes de STARESO n'ont pas remarqué d'augmentation particulière de la mortalité des poissons lors de l'augmentation du trafic maritime. Des changements comportementaux d'évitement à l'approche des bateaux sont observés. Durant les journées de la saison estivale, un changement comportemental plus marqué est constaté : à la pointe de la Revellata, le mérrou (*Epinephelus marginatus*) et les autres espèces de poissons descendent plus en profondeur [Pelaprat_2000]. Toutefois il est difficile de savoir si cet effet est induit par la présence du trafic maritime ou par celle des plongeurs nombreux sur ce site.

La modélisation du bruit rayonné par les petites embarcations en fonction des paramètres

A ce jour, l'ensemble de modèle de bruit rayonné concerne les grandes embarcations (Chapitre 1 - 1.5.3 p24). Dans le chapitre 6, les bateaux sont caractérisés par leurs spectres et un ensemble de paramètres descriptifs : vitesses, catégorie, distances, longueur, etc. Ainsi, l'ensemble des éléments nécessaires pour estimer des modèles de bruit rayonnées à 1 m par les petites embarcations sont présents. Cette estimation peut alors réalisée par régression linéaire entre des sous-ensembles de spectre est les paramètres décrivant le bateau.

La modélisation du bruit rayonné à l'échelle de la baie

La *Directive Cadre pour la Stratégie pour le Milieu Marin* DCSMM préconise le suivi acoustique soit par observations réelles soit par modélisation. Ainsi, de nombreuses études s'intéressent à la modélisation du bruit rayonné de grandes embarcations dans un contexte hauturier. Ces modèles utilisent alors les données AIS en entrée qui permettent, en plus de connaître la position du bateau, d'extraire des informations sur sa longueur, son tonnage, etc. Dans un contexte de suivi côtier de tels outils ne peuvent être utilisés. Des modèles statistiques du nombre de passages de bateaux par route de navigation peuvent toutefois être utilisés si le trafic maritime est réparti selon des routes particulières et avec une fréquence de passage journalière homogène.

Une première méthode simple de modélisation de bruit rayonné peut être utilisée en exploitant directement les résultats présents dans ce manuscrit. En effet, le chapitre 3 a mis en évidence la possibilité de localiser le trafic maritime à l'aide d'une caméra. Des cartes du trafic maritime correspondant au nombre de détections par pixel sont présentés. Parallèlement, le chapitre 4 propose un modèle simple reliant le niveau ANL au logarithme en base dix du nombre de bateaux présents dans un périmètre donné : 100m, 300 m et 500 m. En reliant le nombre de détections par pixel au nombre de bateaux réellement passés et en estimant pour chaque pixel le nombre de bateaux présents dans l'heure passée dans le périmètre concerné, des cartes de niveau ANL peuvent être réalisées.

Une deuxième méthode plus complexe de modélisation de bruit rayonné par les bateaux peut être envisagée au regard des résultats et des pistes d'amélioration présentées. En effet, les perspectives du chapitre 3 suggèrent la possibilité de localiser précisément chaque bateau et d'identifier sa catégorie. Le suivi de trajectoire permettrait alors de renseigner la vitesse du bateau. Parallèlement, le chapitre 6 permet l'estimation du bruit rayonné en fonction de la vitesse et de la catégorie de bateau. Une fois le bateau localisé et identifié, la propagation d'un modèle de spectre à travers la baie peut être réalisé en utilisant un code de propagation de type équation parabolique.

Ce modèle de propagation permettrait alors de caractériser le bruit rayonné par les embarcations. Ce modèle peut être complexifié en ajoutant la contribution des sources météorologiques et biologiques récurrentes. Les données recueillies dans le chapitre 5 permettent alors de caractériser la contribution benthique et ichtyologique permanente. De plus, dans ce même chapitre, il a été constaté que les niveaux de référence évoluent en fonction de ces conditions météorologiques. Une analyse du bruit ambiant local en fonction de l'état de mer pourrait être réalisée en utilisation conjointe de ces données météorologiques et acoustiques. La station STARESO effectuant des relevés météorologiques automatisés toutes les 20 minutes, le bruit ambiant renseigné dans le modèle pourrait être ajusté aux conditions climatiques présentes dans la baie.

Annexe 1 : Traitement d'images GoPro®

Cette annexe présente des compléments d'information par rapport au Chapitre 3 : Localisation et création de carte du trafic maritime par traitement d'images – p 47. Cette annexe est divisée en deux sections. La première section présente la formule permettant de relier un pixel de l'image GoPro® à un pixel de la carte de Calvi. La deuxième section présente une étude réalisée sur les performances de localisation de la GoPro®.

Précision sur la méthode : formule pour passer d'un pixel de l'image GoPro à un pixel de la carte

La projection des pixels d'une image est réalisée en suivant, pour l'ensemble des pixels compris entre les paraboles de la citadelle et du phare de Stareso, les étapes suivantes. Dans un premier temps, l'indice de parabole sur lequel est située le pixel dans l'image GoPro® est déterminé. Ces paraboles correspondent alors aux paraboles définies par la loi d'estimation de déformation de la GoPro®. La connaissance de cet indice permet d'estimer la distance minimale sur la carte de la baie entre l'observatoire et la droite orthogonale à l'axe de visée passant par le point. La deuxième loi de géoréférencement permet de définir la distance du pixel par rapport à l'axe de visée en fonction de la distance du pixel sur l'image GoPro® par rapport au milieu de l'image et l'indice de la parabole. La position du pixel est obtenue en utilisant les formules suivantes :

$$\begin{cases} X_{p_{carte}}(i, Y_{GoPro}, s) = \frac{(b_{axe_{visée}} - \rho(i, s) \cdot Y_{GoPro} \sqrt{a_{axe_{visée}}^2 + 1}) - (b_{axe_{ortho}} - D_{ortho_{min}}(i, s) \sqrt{a_{axe_{ortho}}^2 + 1})}{a_{axe_{ortho}} - a_{axe_{visée}}} \\ Y_{p_{carte}}(i, Y_{GoPro}, s) = \frac{a_{axe_{visée}}(b_{axe_{ortho}} - D_{ortho_{min}}(i, s) \sqrt{a_{axe_{ortho}}^2 + 1}) - a_{axe_{ortho}}(b_{axe_{visée}} - \rho(i, s) \cdot Y_{GoPro} \sqrt{a_{axe_{visée}}^2 + 1})}{a_{axe_{visée}} - a_{axe_{ortho}}} \end{cases}$$

Avec :

- i : l'indice de la parabole,
- s : l'indice de la session GoPro®,
- Y_{GoPro} : la distance du pixel sur l'image GoPro® par rapport au milieu de l'image,
- $D_{ortho_{min}}(i, s)$ et $\rho(i, s)$: les fonctions de géoréférencement,
- $a_{axe_{visée}}$ et $b_{axe_{visée}}$: le coefficient directeur et l'ordonnée à l'origine de la droite correspondant à l'axe de visée de la caméra,
- $a_{axe_{ortho}}$ et $b_{axe_{ortho}}$: le coefficient directeur et l'ordonnée à l'origine de la droite orthogonale à l'axe de visée de la caméra et passant par l'observatoire.

Performance de localisation

Incertitude de positionnement due à la résolution de la carte de Calvi

L'incertitude de positionnement dépend de la résolution de la carte de Calvi initiale : pour une surface identique, plus la résolution de la carte est importante, moins l'incertitude sera élevée. Dans le cas présent, les fonctions de géolocalisation ont été réalisées en considérant comme support une carte de la baie de Calvi couvrant 14,7 km² et de résolution 981 par 1255. Chaque pixel de cette carte correspond alors une surface d'environ 12 m². Un pixel formant un rectangle de 3,47 m de côté à +/- 0,04 m, cette résolution est adaptée pour la localisation de bateaux.

Incertitude de positionnement due à la méthode et aux résolutions des caméras

Comme vu dans la section précédente, la localisation d'un pixel consiste en trois étapes :

- L'identification de la parabole théorique auquel appartient le pixel sur la photographie,
- L'identification de la distance sur la carte entre la ligne droite correspondant à cette parabole et l'observatoire $D_{ortho_{min}}$,
- L'identification de la distance entre l'axe de visée et le pixel sur la carte $D_{axe_{visée}}$.

Cette méthode de localisation contraint le pixel à être défini dans un espace d'incertitude de type trapèze (Figure 116). En effet, chaque pixel étant localisé entre deux paraboles, une incertitude sur l'indice de la parabole de 1 est considérée. Ces deux paraboles correspondent alors à deux lignes droites sur la carte. La distance avec l'axe de visée dépendant de l'indice de la parabole, la portion de segment correspondant aux possibles relocalisations du pixel diffère pour les deux lignes droites. La hauteur de ce trapèze correspond alors à l'incertitude sur l'identification de la distance $D_{ortho_{min}}$ et l'angle formé par les côtés non parallèles est lié à l'incertitude sur l'identification de la distance $D_{axe_{visée}}$. La largeur des deux côtés parallèles du trapèze correspond à l'incertitude sur l'estimation de la distance $D_{axe_{visée}}$ pour un indice de la parabole donné. Une surface d'incertitude est alors définie en utilisant la formule :

$$A_{incertitude}(i) = \partial_{D_{ortho_{min}}}(i) \cdot \left(\frac{\Delta_{D_{axe_{visée}}}(i) + \Delta_{D_{axe_{visée}}}(i+1)}{2} \right)$$

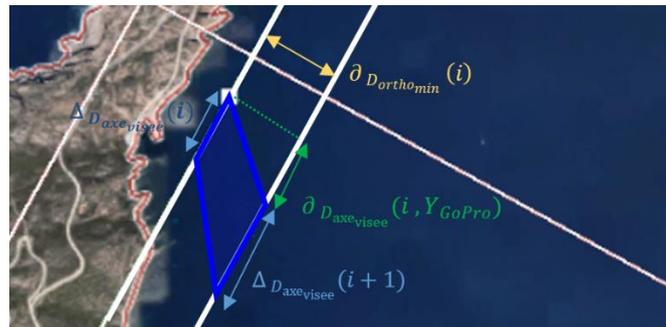


Figure 116 : Trapèze d'incertitude lors de la relocalisation

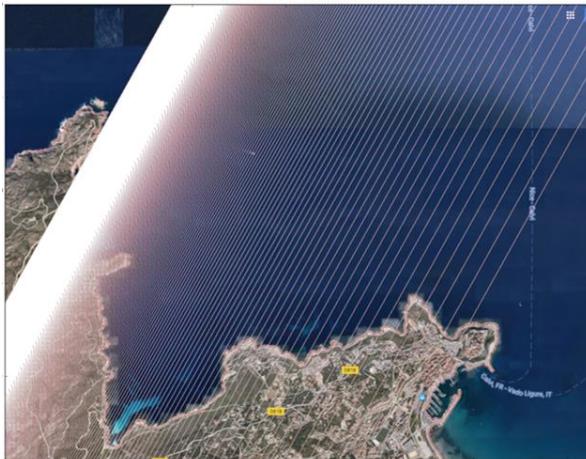
La résolution de la caméra conditionne le nombre de pixels exploitables et par conséquent, crée une incertitude sur la relocalisation de chaque pixel. Dans le cas présent, les deux caméras utilisées ont des résolutions différentes : la GoPro® A à une résolution de 1944x2592 pixels et la GoPro® T à une résolution de 3000x4000 pixels. L'incertitude de relocalisation de chaque pixel dépend alors de la caméra considérée. Afin d'évaluer uniquement les incertitudes liées à la résolution de la caméra, les coefficients obtenus en réalisant les différentes régressions linéaires seront considérés sans incertitude : seule une incertitude de 1 sur l'indice de la parabole est considérée.

La Figure 117 représente le résultat de la fonction de géolocalisation reliant une parabole à une droite linéaire sur la carte de Calvi, pour un maillage de parabole espacé de 1 pixel. La distance minimale entre l'observatoire et la droite linéaire $D_{ortho_{min}}$ est inversement proportionnelle à l'indice de la parabole. Ainsi, l'espacement entre chaque ligne droite augmente lorsque l'on s'écarte de la position de l'observatoire. Cette augmentation est plus marquée lorsque l'on s'éloigne fortement de l'observatoire. Cet écart issu d'un maillage initial unitaire, correspond à l'incertitude sur l'estimation de la distance $D_{ortho_{min}}$ et est estimé en utilisant la formule :

$$\frac{\partial D_{ortho_{min}}(i)}{\partial i} = \frac{\alpha_d}{(\alpha_d \cdot i + \beta_d)^2}$$

A cause des différences de résolution entre les deux caméras, les incertitudes de positionnement sont plus faibles pour la GoPro® T. L'incertitude sur l'estimation de $D_{min_{obs}}$ est inférieure à 1 pixel, soit 3,47m, jusqu'à une distance $D_{ortho_{min}}$ de 530m pour la GoPro® A et de 680 m pour la GoPro® T et devient supérieur à 5 pixels, soit 17,35 m pour une distance $D_{ortho_{min}}$ de 1180m pour la GoPro® A et de 1510 m pour la GoPro® T. L'incertitude sur $D_{ortho_{min}}$ devient alors supérieure à 30 m pour une distance de 1545m pour la GoPro® A et de 1980 m pour la GoPro® T et atteint la valeur maximale de 144,4 m, pour la GoPro® A et de 78,4 m pour la GoPro® T, pour les droites positionnées entre les deux pointes de Calvi.

Géolocalisation sur la carte de Calvi d'un maillage de parabole espacé de 1 pixel sur les images de la GoPro® A



Géolocalisation sur la carte de Calvi d'un maillage de parabole espacé de 1 pixel sur les images de la GoPro® T

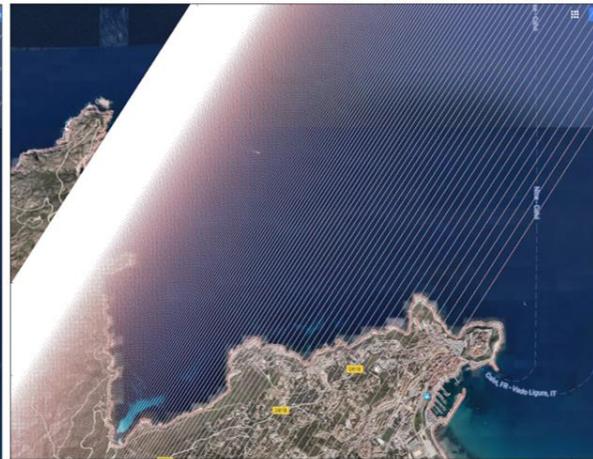


Figure 117 : Géolocalisation sur la carte de Calvi des paraboles des images GoPro® A (à gauche) et T (à droite) correspondant à un maillage de parabole espacé de 1 pixel

Pour une parabole donnée, la distance sur la carte entre l'axe de visée et le pixel $D_{axe_{visee}}$ suit une loi linéaire en fonction de la distance sur l'image GoPro projetée sur l'axe x, reliant le pixel au centre de l'image Y_{GoPro} . De part l'ouverture de l'angle, l'intervalle correspondant à un pixel sur l'image augmente lorsque la droite s'éloigne de l'observatoire. Cet intervalle correspond à l'incertitude $\Delta_{D_{axe_{visee}}}$ sur l'estimation de la variable $D_{axe_{visee}}$ et prend toutefois de faibles valeurs :

- Pour la GoPro® A, 1 pixel sur l'image correspond à 0,06 pixel sur la carte (soit 20 cm) pour une distance de 170 m et 0,7 pixel (soit 2,4 m) pour une distance de 3390 m.
- Pour la GoPro® T, 1 pixel sur l'image correspond à 0,04 pixel sur la carte (soit 14 cm) pour une distance de 185 m et 0,84 pixel (soit 2,9 m) pour une distance de 3277 m.

La surface globale d'incertitude de localisation augmente donc lorsque la distance $D_{ortho_{min}}$ augmente. Cette surface d'incertitude est inférieure à 1pixel², soit 12,04m², pour une distance 950 m pour la GoPro® A et de 1270 m pour la GoPro® T et devient supérieure à 36m², soit 3 pixels², pour une distance de 1414 m pour la GoPro® A et de 1810 m pour la GoPro® T. A proximité de la citadelle, la surface de zone d'incertitude est conséquente : plus de 358 m² pour la GoPro® A et plus de 225 m² pour la GoPro® T.

Le paramètre surface d'incertitude ne permet pas de caractériser la variance induite par de l'incertitude sur l'estimation de la distance $D_{axe_{visee}}$ en fonction de l'indice de la parabole. Cette variation se retrouve dans la pente formée par le trapèze d'incertitude. Ce coefficient d'incertitude

dépend de deux paramètres : l'indice de la parabole et la distance projetée sur l'axe x reliant le pixel au centre de l'image Y_{GoPro} , et est estimé en utilisant la formule suivante :

$$\frac{\partial_{D_{axe\,visée}}(i, Y_{GoPro})}{\partial i} = \frac{\alpha_{\rho} \cdot \partial i \cdot Y_{GoPro}}{(\alpha_{\rho} \cdot i + \beta_{\rho})^2}$$

La Figure 29 présente cette incertitude de positionnement en fonction de la distance projetée sur l'axe x par rapport au centre de l'image GoPro® selon l'axe x et en fonction de l'indice de la parabole selon l'axe y. Sur cette figure, l'échelle de couleur est limitée à 1 pixel pour pouvoir mieux observer l'évolution de l'incertitude en fonction de ces deux paramètres. L'incertitude de positionnement augmente lorsque l'on s'écarte de l'angle de visée de la GoPro et lorsque la distance minimale entre la droite et l'observatoire augmente. L'écart induit par les variations de l'indice de la parabole est plus déterminant que les écarts observés pour la variation du paramètre de Y_{GoPro} . L'influence du paramètre Y_{GoPro} augmente lorsque l'indice de la parabole augmente. Contrairement au cas précédent, les incertitudes sont plus marquées pour la caméra de meilleure résolution. Quel que soit la valeur du paramètre Y_{GoPro} , cette valeur d'incertitude est inférieure à 1 pixel, soit 3,47 m, jusqu'à une distance de 428 m pour la GoPro® A et de 660 m pour la GoPro® T et reste inférieur à 5 pixels, soit 17,35 m, pour une distance de 1095 m pour la GoPro® A et de 1421 m pour la GoPro® T. Lorsque l'indice augmente, des écarts conséquents sont observés. A proximité de la citadelle, 57 % des incertitudes liées à la distance $D_{axe\,visée}$ sont comprises entre 10 et 23 pixels pour la GoPro® A et 68 % sont comprises entre 10 et 32 pixels pour la GoPro® T.

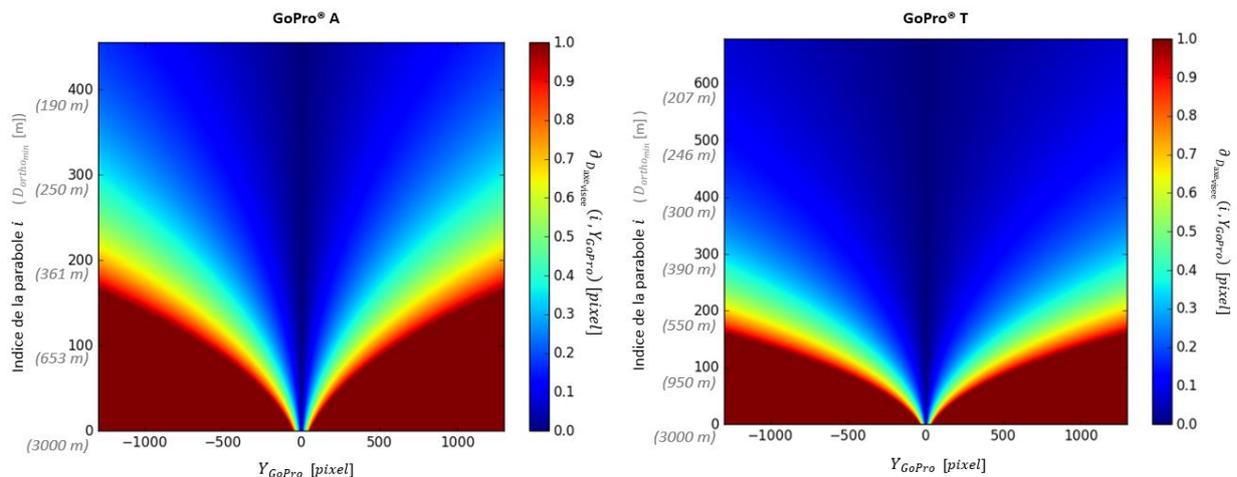


Figure 118 : Incertitude sur le positionnement sur l'axe orthogonal, pour la GoPro® A (à gauche) et pour la GoPro® T (à droite) avec application d'un seuil de 1 pixel

Estimation empirique de l'écart de localisation

Le report des positions d'un pixel de l'image GoPro® sur la carte dépend directement de 7 paramètres : le coefficient directeur de l'axe de visée et son ordonnée à l'origine, les coefficients de régression linéaire des deux fonctions de géoréférencement, l'indice de la parabole. Ces paramètres ont été obtenus expérimentalement, soit par régressions linéaires réalisées à partir d'annotations de pixels sur l'image GoPro®, soit directement par l'annotation des pixels. Cette annotation manuelle a été réalisée pour chaque session GoPro®. L'estimation de l'erreur de localisation est donc réalisée de manière empirique par comparaison des résultats obtenus par traitement à la réalité terrain.

Parallèlement à l'acquisition des images GoPro, un récepteur GPS avait été placé sur l'un des bateaux de STARESO. Il est à noter que l'incertitude de positionnement du récepteur GPS est estimée entre 5 et 10m mais ne sera pas prise en compte pour cette analyse. Parmi, les différents trajets réalisés par

le bateau, 8 trajets parcourent des zones variées de la baie. Les traces ont été enregistrées avec les deux caméras. Ces traces se répartissent de la manière suivante :

- 2 traces GPS partant en direction de la pointe de la Revellata,
- 2 traces GPS partant en direction de la plage de l'Alga,
- 2 traces GPS partant en direction de la Citadelle de Calvi,
- 2 traces GPS partant dans la baie.

La Figure 119 présente les différentes traces GPS enregistrées. Ces traces correspondent aux lignes droites en trait plein et ont été obtenues en utilisant un algorithme codé en python, permettant de déchiffrer les trames GPS du récepteur et de repositionner sur la carte chaque position. Une couleur est associée à chaque trace GPS. Pour chaque parcours, la position du bateau obtenue par l'algorithme de relocalisation est présentée en trait pointillé de la même couleur sur cette même carte. Pour cette étude, le pixel correspondant au centre du bateau est manuellement annoté.

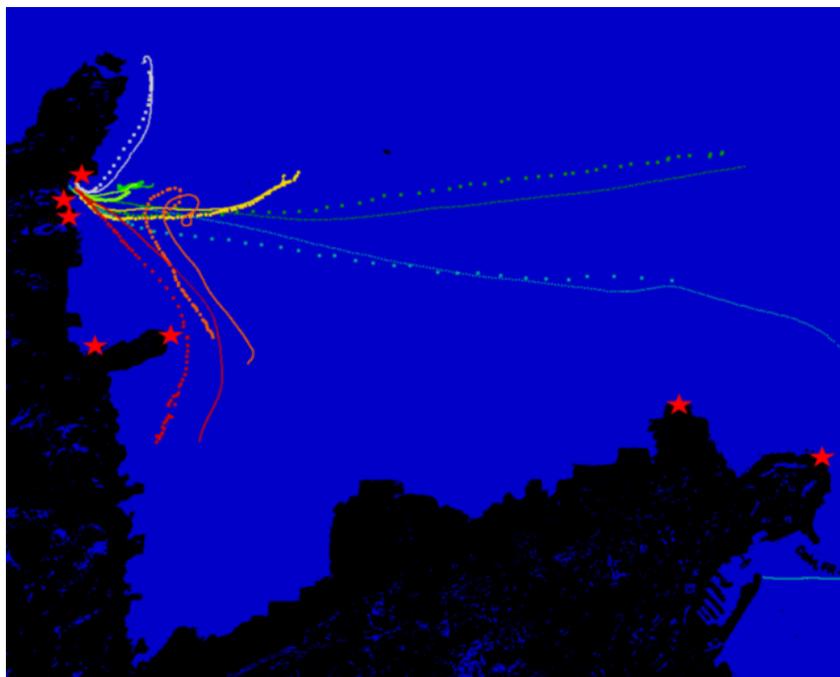


Figure 119 : Carte de la baie de Calvi avec en trait plein les positions GPS des 8 parcours considérés et en pointillés la relocalisation du bateau effectuée en utilisant les fonctions de repositionnement

La Figure 120 présente l'écart observé entre ces deux traces. Sur cette carte, la terre est représentée en noir, la mer est représentée en gris et l'erreur de localisation est représentée en échelle de couleur allant du rose au rouge. La couleur rose correspond aux faibles valeurs d'erreur de localisation et la couleur rouge correspond aux fortes valeurs d'erreur de localisation. L'erreur de localisation semble liée à plusieurs paramètres : l'angle par rapport à l'axe de visée, l'intersection avec cet axe, les distances $D_{ortho_{min}}$ et $D_{axe_{visée}}$. L'écart entre les traces est plus marqué pour :

- Les distances $D_{ortho_{min}}$ faibles, à cause d'une courbure plus prononcée des trajectoires,
- La distance $D_{ortho_{min}}$ pour les trajectoires qui ont un angle élevé par rapport à l'axe de visée,
- L'angle formé entre l'axe de visée et les trajets est élevé.

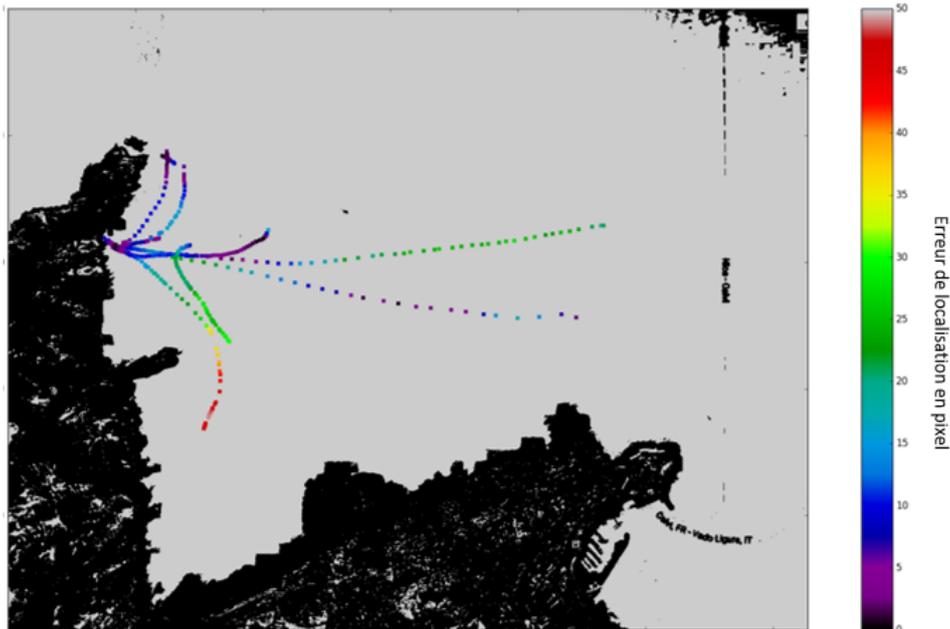


Figure 120 : Erreur de positionnement entre les coordonnées GPS et la relocalisation depuis les images des caméras

Erreur de localisation pour de faibles distances

Pour des distances $D_{ortho_{min}}$ inférieures à 1000 m, une différence dans la forme de la trajectoire, et plus précisément dans le rayon de courbure de la trajectoire est notée. Pour le trajet passant au plus proche de la citadelle, la trajectoire issue de la localisation par traitement d'image prend la forme d'une courbure, alors que la trajectoire GPS forme une ligne droite. Cette différence de courbure provoque alors une erreur de localisation au maximum de 80 m à une distance $D_{ortho_{min}}$ de 520 m. De même, pour le trajet jaune allant au milieu de la baie et le deuxième trajet allant à la citadelle, la courbure est plus prononcée dans la localisation par traitement d'image, que lors de l'affichage de la trace GPS. Cette différence de courbure provoque alors une erreur de localisation maximale de 40 m à une distance $D_{ortho_{min}}$ de 500 m pour le premier trajet et une erreur de localisation maximale de 46 m à une distance $D_{ortho_{min}}$ de 417 m pour le deuxième trajet. La différence entre les traces devient alors inférieure à 10 m pour une distance $D_{ortho_{min}}$ de 750 m pour les deux trajets.

Erreur de localisation pour des trajectoires perpendiculaire à l'axe de visée

L'effet angulaire est fortement marqué lorsque l'on considère les trajets allant à la pointe de la Revellata et le trajet allant au plus près de la Citadelle. Les deux trajets allant à la pointe de la Revellata forment un angle de 90° avec l'axe de visée de la GoPro. L'écart entre les traces GPS et les positions relocalisées augmente avec l'éloignement par rapport à l'observatoire de vérité terrain : une erreur de 34 m, soit 10,6 % de la distance, est présente à une distance de 320 m de l'observatoire et une erreur de 52 m, soit 11,9 % de la distance, est présente à une distance de 436 m de l'observatoire.

L'erreur maximale de localisation est alors estimable en considérant l'ensemble des portions formant un angle à plus de 80° avec l'axe de la visée : les deux trajets allant à la pointe de la Revellata et la fin du trajet allant à la plage de l'Alga en passant au plus proche de la pointe de l'Oscelluccia. Cette erreur est essentiellement liée à distance entre l'observatoire et la droite orthogonale à l'axe de visée passant par le point considéré, avec un pourcentage de variance capturé par la régression linéaire R^2 de 97,7%. En effet, les coefficients de corrélation entre l'erreur de localisation et l'éloignement du pixel par rapport à l'axe de visée et avec le ratio entre cet éloignement et l'éloignement maximal lié à l'angle

d'ouverture de la caméra sont de 0,84 et 0,15. L'erreur de localisation pour un angle de visée supérieur à 80° s'exprime alors empiriquement à l'aide de la formule :

$$\varepsilon_{loc} = 0,17 \cdot D_{ortho_{min}} - 31,1$$

Ainsi, plus la distance entre l'observatoire et la droite orthogonale à l'axe de visée passant par le point est importante, plus l'erreur augmente. Cette erreur de localisation est inférieure à 20m pour une distance de 300m, représentant alors 6,5 % de la distance, et devient supérieure à 50 m pour une distance de 475 m, représentant alors 10,5 % de la distance. Entre d'une distance de 1500m et 3000m de l'observatoire, l'erreur de localisation est comprise entre 15 et 16% de la distance, soit entre 230 et 480 m. Cette équation permet en partie d'expliquer la différence entre le minimum de l'erreur de l'axe passant au plus proche de la citadelle et l'intersection entre l'axe de visée et la trajectoire du bateau : à une distance de 1750 m, une erreur maximale de 270 m est théoriquement estimée et une erreur de 300m a été mesurée.

Erreur de localisation en fonction de l'angle de visée

Malgré la forte distance à l'observatoire, l'écart entre les traces GPS et les traces issues de l'analyse par caméra est très faible pour le trajet allant au plus proche de la Citadelle. Ce trajet coupe l'axe de visée au milieu de la baie en formant un angle de 20°. Pour ce trajet, l'erreur atteint un minimum de 2 m à une distance 1730 m de l'observatoire. Dans la portion du trajet à angle constant, l'erreur de localisation augmente linéairement lorsque que le trajet s'écarte de l'axe de visée pour atteindre 30 m à une distance de 1245 m et 25 m à 2165 m. Ces deux distances correspondent alors à un éloignement de 176 m et 158 m de la trajectoire par rapport l'axe parallèle à l'axe de visée passant par le point où l'erreur est minimale. Dans ce cas, l'erreur de localisation représente alors 17 % et 15,8 % des valeurs d'éloignement par rapport à l'axe de visée.

Les trajectoires longues allant vers la plage de l'Alga et vers la citadelle forment des angles différents avec l'axe de visée : 11° (Alga au plus proche), 20° (Citadelle au plus proche), 26° (Alga au plus loin), et 37° (Citadelle au plus loin). Lorsque l'on considère les portions de trajectoire linéaires, l'erreur de localisation est proportionnelle à la distance $D_{ortho_{min}}$, avec des coefficients de régression linéaire compris entre 0,91 et 0,95. Sur ces portions, l'erreur de localisation est inférieure à 100 m. La Table 79 résume les résultats de cette la régression linéaire. Hormis pour l'angle de 11°, le coefficient directeur augmente lorsque l'angle formé avec l'axe de visée augmente. Ainsi, lorsque le bateau s'éloignera du point d'intersection entre sa trajectoire et l'axe de visée, une même variation de la distance $D_{ortho_{min}}$ provoquera une plus faible erreur de localisation lorsque l'angle par rapport à l'axe de visée est faible. En effet, une variation de 500 m provoque une erreur de 40,5 m dans le cas de la trajectoire Citadelle au plus loin, une erreur de 37,6 dans le cas de la trajectoire Alga au plus loin et une erreur de 34,5 m dans le cas de la trajectoire Citadelle au plus proche.

Trajet	Angle formé avec l'axe de visée	Coefficient directeur	Ordonnée à l'origine	Coefficient de régression linéaire
Citadelle au plus loin	37°	0.0811	-49.18	0,91
Alga au plus loin	26°	0.0753	23,8	0,93
Citadelle au plus proche	20°	-0.0691	120,6	0,95
Alga au plus proche	11°	0,1300	-4,22	0,93

Table 79: Résultat de la régression linéaire entre l'erreur de localisation et la distance $D_{ortho_{min}}$ pour les différents trajets.

Annexe 2 : Solutions paramétriques simples permettant de relier les descripteurs acoustiques aux indicateurs du trafic maritime

Cette annexe présente les solutions paramétriques simples mise en œuvre pour relier les paramètres acoustiques aux indicateurs de vérité terrain. Cette annexe est divisée en deux sections. La première section présente la formule obtenue dans le cadre de l'étude de du SPL, ainsi que la formule théorique classique d'estimation de perte de propagation. La deuxième section présente les formules des modèles reliant l'ANL et le nombre de bateaux.

Estimation du SPL en fonction du logarithme en base dix la distance au plus proche

Solution paramétrique simple

En effet, les résultats de la régression linéaire des valeurs statistiques montrent que ces valeurs évoluent en fonction de l'indice du quartile et semblent suivre une loi mathématique. Cette analyse est alors répétée pour une plus grande échelle : pour chaque intervalle de distance, les valeurs de 100 centiles sont estimées. Une régression linéaire est alors appliquée sur la valeur de chaque centile en fonction de la distance du bateau au plus proche. Les valeurs statistiques sont alors définies par :

$$SPL_{C^{\text{ème centile}}} = SL_{C^{\text{ème centile}}} + A_{p^{\text{ème centile}}} \cdot \log_{10}(D)$$

La valeur absolue de ce coefficient de régression linéaire évolue de 0,36 à 0,93 dans la bande de fréquence de 100Hz – 30 kHz, et de 0,55 à 0,95 pour la bande de tiers d'octave de 1250Hz. Ce coefficient reste en valeur absolue mais est supérieur à 0,8 du 17^{ème} au 96^{ème} centile pour la bande de fréquence 100Hz – 30 kHz et du 9^{ème} au 95^{ème} centile pour la bande de tiers d'octave de 1250Hz. Les deux coefficients, $SL_{p^{\text{ème centile}}}$, $A_{p^{\text{ème centile}}}$ suivent alors une loi quadratique en fonction de l'indice du centile considéré.

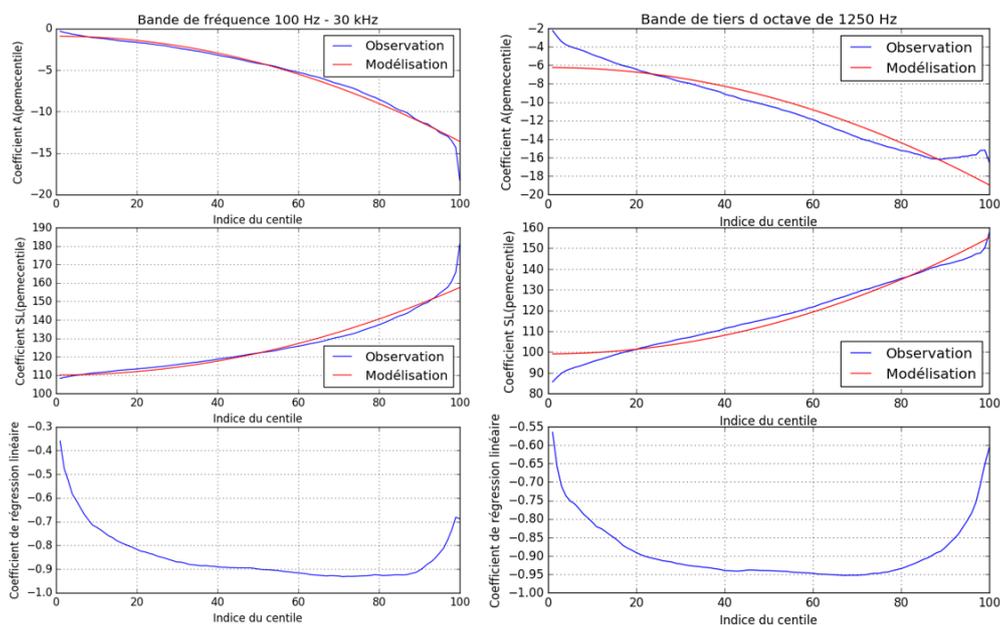


Table 80: Affichage des résultats de la régression linéaire entre la valeur statistique obtenue pour le C^{ème} centile du SPL et le logarithme en base dix de la distance la plus proche, pour la bande de fréquence 100 Hz – 30 kHz (à gauche) et la bande de tiers d'octave de 1250 Hz (à droite). Les résultats, en bleu, correspondent aux coefficients $SL_{C^{\text{ème centile}}}$, $A_{C^{\text{ème centile}}}$ et au coefficient de régression linéaire en fonction de l'indice du centile. Les courbes rouges correspondent aux résultats de la modélisation de ces coefficients par des lois quadratique en fonction de l'indice du centile.

La régression linéaire de ces coefficients en fonction du carré de l'indice du centile permet alors de modéliser ces lois. Les coefficients de régression linéaire obtenus sont meilleurs lorsque l'on considère la bande de fréquence 100 Hz – 30 kHz : supérieurs à 0,978 pour la bande 100Hz-30kHz et supérieurs à 0,945 pour la bande de tiers d'octave de 1250 Hz. Ce coefficient augmente lorsque l'on considère seulement les centiles dont la régression linéaire avait un coefficient supérieur à 0,8 (Table 81).

Coefficient de régression linéaire >	Bande de fréquence 100 Hz- 30 kHz			Bande de tiers d'octave de 1250 Hz		
	A_b	A_a	Coefficient de régression R	A_b	A_a	Coefficient de régression R
0	-0,001269	-0,9184	-0,989	-0,00127	-6,2368	-0,945
0,8	-0,001195	-1,1285	-0,998	-0,00129	-6,6019	-0,974
	B_b	B_a	Coefficient de régression R	B_b	B_a	Coefficient de régression R
	0	0,004749	110,0621	0,978	0,00560	99,1078
0,8	0,004332	111,0489	0,993	0,00535	100,9845	0,990

Table 81 : Résultat des régressions linéaires des coefficients $SL_{p^{\text{ème centile}}}$, $A_{p^{\text{ème centile}}}$ en fonction de l'indice du centile.

Les $SL_{p^{\text{ème centile}}}$ et $A_{p^{\text{ème centile}}}$ s'écrivent alors sous la forme :

$$A(p) = A_b + A_a p^2 \quad \text{et} \quad SL(p) = B_b + B_a p^2$$

Il est alors possible de définir une loi permettant d'estimer la valeur du $p^{\text{ème}}$ centile du SPL en fonction du logarithme de la distance au plus proche.

$$SPL_{max}(D, p) = B_b + B_a p^2 + (A_b + A_a p^2) \cdot \log_{10}(D)$$

Par définition d'un centile, cette loi permet de définir la valeur maximale du SPL atteinte pour une probabilité de p %. De manière analogue, cette formule permet de définir le niveau SPL minimal associé à une probabilité p : $SPL_{min}(D, p) = SPL_{max}(D, 100 - p)$.

Ainsi, le niveau SPL peut être estimé dans un intervalle d'incertitude fixé par une probabilité répondant à la formule suivante :

$$SPL(D, p) = B_b + B_a \left(\frac{100^2 + p^2}{4} \right) + \left(A_b + A_a \left(\frac{100^2 + p^2}{4} \right) \right) \log_{10}(D) \pm 50p(B_a + A_a \cdot \log_{10}(D))$$

Ce niveau SPL correspond alors à l'ensemble des valeurs obtenues entre les centiles $\frac{1006-p}{2}$ et $\frac{100+p}{2}$. Cette fonction montre que l'intervalle de définition du SPL est directement lié à la probabilité.

Formule de propagation classique

Des formules de propagation simple permettent d'estimer un niveau acoustique en fonction du niveau source et de la distance :

$$RL = SL - TL \quad \text{Avec} \quad TL = \text{Coeff}_{géo} \cdot \log_{10}(D) + \alpha \cdot \frac{D}{1000}$$

Avec :

- SL : le niveau source exprimé en dB.
- TL : les pertes de propagation exprimées en dB.
- D : la distance entre le bateau et l'enregistreur, exprimé en m.

- $Coef f_{géo}$: le coefficient caractérisant les pertes géométriques. Usuellement, ce coefficient est considéré à 20 pour le milieu profond et à 10 pour les milieux côtiers. Dans le cas présent, l'étude à montrer que ce coefficient est de 15.
- α : le coefficient d'absorption moléculaire, exprimé en dB/Km. Ce coefficient peut être estimé en considérant la formule de François Garnison, la formule de Throp en Atlantique, et la formule de Leroy en Méditerranée.

Solutions paramétriques simple reliant l'ANL au nombre de bateaux

L'analyse de la distribution de l'ANL en fonction du logarithme du nombre de bateaux a permis de mettre en évidence le lien existant entre ces paramètres pour un nombre minimal de bateaux. Les résultats de la régression linéaire entre ces deux paramètres (Table 82) permettent alors de définir des lois permettant d'estimer l'une des variables en fonction de l'autre.

Distance	Valeurs Statistique	Bande 100 Hz – 30 kHz				Bande de tiers d'octave de 2500 Hz			
		Coefficient de la pente : $A_{Q_i,R}$	Valeur à l'origine : [dB re 1μPa] : $B_{Q_i,R}$	Coefficient de régression R	Valeur à N_{min} [dB re 1μPa] ANL_{min}	Coefficient de la pente : $A_{Q_i,R}$	Valeur à l'origine : [dB re 1μPa] : $B_{Q_i,R}$	Coefficient de régression R	Valeur à N_{min} [dB re 1μPa] ANL_{min}
100m	Q1	8,27	102,34	0,9699	108,78	17,34	74,44	0,97136	87,93
	Q2	7,94	103,25	0,9559	109,43	16,29	76,89	0,96364	89,57
	Q3	8,50	103,36	0,9048	109,97	14,93	79,54	0,93797	91,16
	Whisker	8,84	104,88	0,7351	111,75	11,32	87,19	0,75245	96,00
300m	Q1	9,11	99,00	0,9599	108,84	18,39	68,27	0,96953	88,12
	Q2	8,62	100,14	0,9619	109,45	17,08	71,18	0,97757	89,61
	Q3	8,74	100,44	0,9527	109,87	14,26	76,25	0,96748	91,64
	Whisker	8,18	102,59	0,8485	111,42	8,07	88,23	0,69337	96,93
500m	Q1	9,32	97,94	0,9760	108,90	20,40	63,99	0,97371	87,98
	Q2	9,04	98,89	0,9756	109,52	19,76	65,90	0,97357	89,14
	Q3	9,19	99,21	0,9182	110,01	17,23	70,83	0,93830	91,10
	Whisker	8,98	101,12	0,7189	111,68	12,47	81,10	0,67703	95,76
1000m	Q1	6,50	100,79	0,9004	108,96	17,60	65,01	0,94789	87,09
	Q2	6,85	100,91	0,9026	109,51	15,88	69,06	0,94354	89,00
	Q3	6,94	101,48	0,9049	110,19	15,13	71,71	0,92880	90,71
	Whisker	7,60	102,51	0,7442	112,05	11,44	81,78	0,65027	96,13

Table 82 : Résultat des régressions linéaires des valeurs statistiques de l'ANL en fonction du logarithme du nombre de bateaux

Estimation du nombre de bateaux minimal en fonction du rayon d'écoute

Pour les deux bandes de fréquence étudiées, le nombre limite est de 6 bateaux pour le disque de 100m, 12 bateaux pour le disque de 300m, 15 bateaux pour le disque de 500m, 18 bateaux pour le disque de 1000m. Il est à noter que ce nombre limite semble suivre une loi logarithmique défini par la relation suivante :

$$N_{min} = 12 \cdot \log_{10}(R) - 18 \quad \text{Avec : } R \text{ le rayon du disque exprimé en m}$$

Les coefficients de cette relation sont spécifiques à la baie de Calvi et dépendent d'un grand nombre de paramètres : le temps d'intégration, le niveau source des bateaux, le bruit ambiant, la hauteur d'eau, les équations de propagation, etc.

Estimation de l'ANL en fonction du nombre de bateaux

En considérant les résultats obtenus par les régressions linéaires des trois quartiles, des équations d'estimation du niveau ANL en fonction du nombre de bateaux peuvent être approximées. Ces équations, seulement valables durant la journée, permettent alors de définir une valeur médiane $ANL_{med}(R, N)$ et un intervalle d'incertitude, le multiple c de l'interquartile ANL_{IQR} :

$$ANL(R, N) = ANL_{med}(R, N) + c \cdot ANL_{IQR}(R, N)$$

Par construction, pour un coefficient c égal à 1, ces équations permettent d'estimer l'ANL avec une probabilité de succès au minimum supérieure à 50 %. La forme générique de ces équations est :

$$\begin{aligned} ANL_{med}(R, N) &= B_{Q_2,R} + A_{Q_2,R} \cdot \log_{10}(\max(N, N_{min})) \\ ANL_{IQR}(R, N) &= B_{Q_3,R} - B_{Q_1,R} + (A_{Q_3,R} - A_{Q_1,R}) \cdot \log_{10}(\max(N, N_{min})) \end{aligned}$$

Avec : - N : le nombre de bateaux présents,
 - N_{min} : le nombre de bateaux minimal,
 - R : le rayon du disque exprimé en m,
 - $A_{Q_i,R}$ et $B_{Q_i,R}$: le coefficient issu de la régression linéaire pour un disque de rayon R , pour le $i^{\text{ème}}$ quartile.

La largeur de cet intervalle d'incertitude peut être diminuée à 10 % de la dynamique totale, soit 0.8 dB, en modifiant le paramètre c . Dans ce cas, pour la bande de fréquence 100Hz-30 kHz, le pourcentage d'adéquation de la loi chute entre 29,0 et 37,5 %.

Définition d'une loi permettant d'estimer le nombre de bateaux en fonction de l'ANL

De manière analogue, il est possible d'estimer le nombre de bateaux présents dans la baie en fonction de l'ANL mesuré. Au vu des résultats présentés dans la section précédente, cette analyse sera réalisée sur la bande de fréquence 100Hz – 30 kHz. Les résultats obtenus par les régressions linéaires des trois quartiles permettent alors de définir une valeur médiane $NbVessel_{med}(R, N)$ et un intervalle d'incertitude, le multiple c de l'interquartile $NbVessel_{IQR}(R, N)$:

$$NbVessel(R, N) = NbVessel_{med}(R, N) + c \cdot NbVessel_{IQR}(R, N)$$

Par construction et pour un coefficient de 1, ces équations permettent d'estimer le nombre de bateaux avec une probabilité de succès au minimum supérieure à 50 %. Le nombre de bateaux est alors défini dans un intervalle selon les équations suivantes :

$$\begin{aligned} NbVessel_{med}(R, ANL) &= \begin{cases} si ANL > 109,4 & 10^{\frac{\max(ANL, ANL_{min}) - B_{Q_2,R}}{A_{Q_2,R}}} \\ si ANL \leq 109,4 & \frac{N_{min}}{2} \end{cases} \\ NbVessel_{IQR}(R, ANL) &= \begin{cases} si ANL > 109,4 & 10^{\frac{ANL - B_{Q_1,R}}{A_{Q_1,R}}} - 10^{\frac{ANL - B_{3,R}}{A_{Q_3,R}}} \\ si ANL \leq 109,4 & \frac{N_{min}}{2} \end{cases} \end{aligned}$$

Avec : - ANL : l'ANL exprimée en dB re 1 μ Pa,
 - R : le rayon du disque exprimé en m,
 - N_{min} : le nombre de bateaux minimal,
 - $A_{Q_i,R}$ et $B_{Q_i,R}$: le coefficient issu de la régression linéaire pour un rayon de rayon R , pour le $i^{\text{ème}}$ quartile

Annexe 3 : les espaces de représentations et les algorithmes spécifiques

L'analyse spectrale

Le passage dans le domaine fréquentiel est réalisé par estimation de la transformée de Fourier. Cette transformation constitue une décomposition d'un signal en une série de cosinus :

$$FFT(f) = \int_{-T}^T x(t)e^{-j2\pi ft} dt$$

Pour un signal numérique, cette transformation est réalisée en utilisant l'algorithme de transformée de Fourier rapide *FFT (Fast Fourier Transform)*. La transformée de Fourier présente alors une résolution fréquentielle constante. A partir de la moyenne de cette transformée, une estimation de la densité spectrale de puissance (PSD ou *Power Spectral Density*) est réalisée. Cette fonction décrit la puissance d'un signal autour d'une fréquence f et correspond à :

$$PSD(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} E \left[\frac{1}{2T} |FFT(f)|^2 \right]$$

L'analyse DEMON

L'analyse DEMON (*Detection of Enveloppe Modulation On Noise*) permet de démoduler le signal et d'extraire les variations basses fréquences observées dans l'enveloppe du signal. L'enveloppe du signal est estimée après sélection de la bande de fréquence d'intérêt par filtrage passe-bande. Cette enveloppe correspond à la valeur absolue du signal analytique estimé en utilisant la transformée de Hilbert :

$$v(t) = |x(t) + i \mathcal{H}(x(t))| \quad \text{Avec : } \mathcal{H}(x(t)) \text{ la transformée de Hilbert du signal}$$

La valeur moyenne RMS (Root Mean Squart) de l'enveloppe ainsi qu'un sous-échantillonnage des données est ensuite effectuée. Le signal est enfin filtré avec un filtre passe-haut afin de retirer la composante continue. Après démodulation du signal, l'analyse est poursuivie en estimant la FFT du signal afin d'extraire l'information portée par l'enveloppe. La Figure 121 présente un schéma de la méthode d'analyse DEMON.

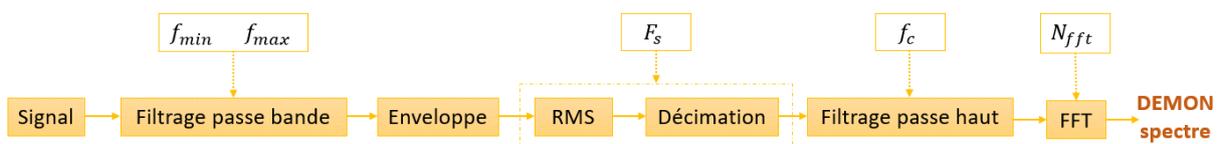


Figure 121 : Schéma de l'analyse DEMON

L'analyse cepstrale

Le domaine cepstrale est un domaine analogue au domaine temporel obtenu à partir du domaine spectral modifié. Par analogie avec les passages dans le domaine fréquentiel, [Bogert_1963] définit les dénominations liées au domaine cepstrale par les anagrammes de celles utilisées dans le domaine spectral. Ainsi le spectre devient le *cepstre*, la fréquence devient la *quéfrence* et le filtrage devient le *liffrage*. Le cepstre est défini par la formule suivante :

$$c(p) = FFT^{-1}[\ln(|FFT[X(t)]|)]$$

Par la présence du terme logarithmique, ce domaine permet de transformer une convolution en une addition :

Temporelle :	$y(t) = x(t) * h(t)$	Convolution
Spectrale :	$Y(f) = X(f) \cdot H(f)$	Multiplication
Cepstrale :	$C_Y(p) = C_X(p) + C_H(p)$	Addition

Particulièrement intéressante pour la suppression d'échos, l'indentification de sources ou bien la modélisation d'un canal de propagation, cette propriété permet ainsi de dissocier une source d'un canal de propagation en effectuant une déconvolution entre le signal en entrée et le filtre parcouru. Le conduit vocal pouvant être considéré comme un résonateur, c'est-à-dire un filtre, cette propriété fait du domaine cepstrale un domaine privilégié du traitement de la parole.

L'analyse des coefficients de Mel (MFCC Mel-Frequency Cepstral Coefficients)

Le domaine cepstral est le plus souvent analysé à travers l'étude des coefficients MFCC (Mel-Frequency Cepstral Coefficients) [Davis_1980]. Les coefficients MFCC sont une variation des coefficients cepstraux dont les bandes de fréquence de ce spectre sont espacées logarithmiquement. L'estimation de ces coefficients est réalisée par transformation en cosinus discret (DCT) de la transformée de Fourier filtrée par un banc de filtres triangulaires MEL (Figure 122). Ces coefficients permettent ainsi une représentation du spectre selon une échelle perceptuelle représentative de l'audition humaine, l'échelle de *fréquence de Mel*, exprimée en Mel:

$$m(f) = 2595 \cdot \log_{10} \left(1 + \frac{f}{700} \right) \quad \text{Avec } f \text{ la fréquence exprimée en Hz.}$$

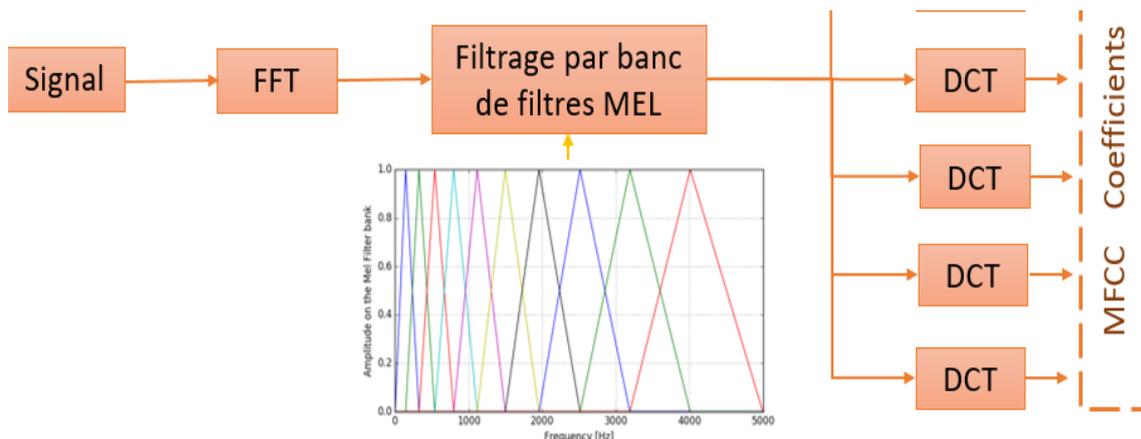


Figure 122: Schéma block de la méthode d'estimation des coefficients MFCC et banc de filtre de Mel

L'analyse par ondelette et par paquets d'ondelette

Inventée en 1983 par *Morlet*, la décomposition en ondelette est couramment utilisée dans le traitement d'images (compression numérique au format JPEG 2000, débruitage, détection de contour), le traitement de la parole, le codage numérique, etc. Similaire à la transformée de Fourier, cette méthode correspond à une décomposition du signal en petites oscillations. La différence entre ces méthodes réside dans le choix de la base de décomposition non exclusivement sinusoïdale et dont la largeur de l'enveloppe est liée à la fréquence de l'oscillation. Ainsi, la décomposition en ondelette offre l'avantage d'une taille de fenêtre d'analyse variable : chaque dilatation et compression de l'ondelette initiale, dit *mère*, donne naissance à une nouvelle échelle. Cette méthode permet une décorrélation entre résolution temporelle et fréquentielle et offre ainsi une résolution temporelle élevée et une résolution basse fréquence pour les hautes fréquences, ainsi qu'une résolution temporelle et haute fréquence faible pour les basses fréquences. Cette analyse peut alors être qualifiée d'étude multi-échelle du signal. Les coefficients de la transformée en ondelette continue sont alors estimés en réalisant une convolution entre le signal et l'ondelette mère $\psi(t)$ étirée ou

comprimée pour chaque échelle s . La discrétisation des paramètres d'échelle s et temporelle τ permet d'estimer la transformée en ondelettes discrètes.

$$TOC(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} X(t) \cdot \psi^* \left(\frac{t - \tau}{s} \right) \cdot dt$$

Etant un outil stationnaire, la transformée de Fourier est sous-optimale pour l'étude de signaux non-stationnaires. La variation de la taille de la fenêtre d'analyse est une propriété intéressante pour l'étude des signaux transitoires, non stationnaire et comportant de fortes singularités, tels que des variations de fréquence dans le temps. Son utilisation n'est pas exclusivement réservée à ce type de signaux ; en atteste les différentes études réalisées sur des signaux stationnaires. Par son aptitude multi-échelle, cet outil est adapté pour l'analyse fractale.

La décomposition multi-échelle peut être réalisée en utilisant différentes méthodes telles que le *Fast Wavelet Transform* ou l'analyse par paquet d'ondelette. Cette deuxième méthode est choisie pour cette étude. La transformée par paquet d'ondelettes repose sur une décomposition par bancs de filtre de chaque signal du niveau précédant en paires, suivie d'un sous-échantillonnage par deux du signal. Les filtres passe haut et passe bas sont des filtres miroirs en quadrature. La Figure 123 présente le schéma block de l'analyse par paquet d'ondelettes. Pour chaque niveau de décomposition, l'énergie est estimée en utilisant la norme l_2 des coefficients d'ondelettes et l'ensemble des résultats est visualisé sous forme d'une carte d'énergie par niveau de décomposition (Figure 123).

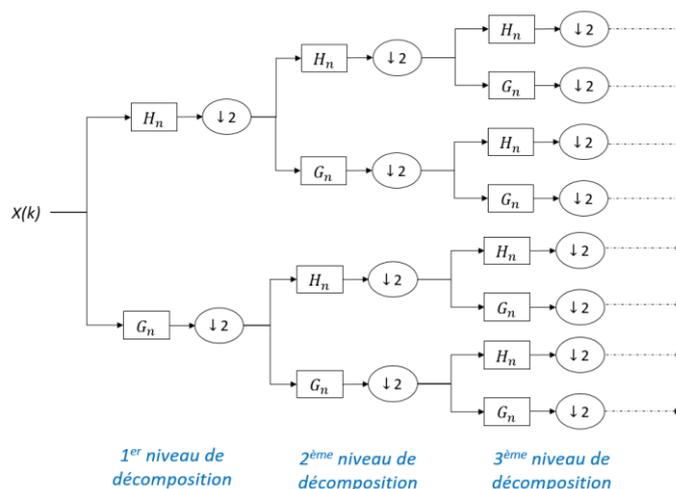


Figure 123: Décomposition multi-échelle par paquet d'ondelettes avec H_n le filtre passe haut et G_n le filtre passe bas

L'algorithme de détection de fondamentale et d'estimation de la distribution d'harmoniques

Dans la littérature du traitement de la parole, de l'analyse musicale et du traitement du signal biomédical, la recherche de la fréquence fondamentale est réalisée à travers différentes méthodes : Yin estimateur [Cheveigne_2002], estimateur des moindres carrés [Li_c_2000, Christensen_2008], estimation du maximum de vraisemblance [Doval_1993], filtrage adaptatif en peigne [Nehorai_1986], filtrage particulaire marginalisé [Dubois_2007, Kim_2008], etc. Dans le cadre des bruits rayonnés par les bateaux, [Sorensen_2010] et [Ogden_2011] estime le coefficient de corrélation de Pearson entre la transformée de Fourier court-terme du signal et un modèle théorique de spectre composé d'un peigne de raies. D'un point de vue plus général, la présence d'harmoniques dans la PSD du signal peut être interprétée comme la présence de pics rythmés détectables par estimation de la fonction d'autocorrélation de la PSD. Cette fonction permet cependant de détecter les rythmes correspondant aux multiples de la fréquence fondamentale. La contribution de ces multiples est limitée lors de l'estimation de la fonction d'autocorrélation complexe [LeBot_b_2015].

Un algorithme de détection automatique d'harmonique à dont été développé au cours de cette thèse en s'inspirant de la méthode proposée par [Sorensen_2010] et [Ogden_2011]. Conformément à leurs descriptions, les premiers essais ont porté sur la corrélation de Pearson entre un peigne d'harmoniques et la PSD. Les résultats observés au cours de cette thèse ont montré une erreur d'estimation de la fréquence fondamentale en présence d'un harmonique fortement marqué. Cette même observation avait été remarquée lors d'un premier essai au cours de cette thèse, de détection automatique d'harmonique par estimation de l'autocorrélation complexe à suppression d'harmoniques sur la PSD. Par ailleurs, il est à noter que du fait de l'absence repérée d'un certain nombre harmoniques, le potentiel de l'autocorrélation complexe ne peut être pleinement exploité pour cette application d'étude des bruits rayonnés par de petites embarcations. Plusieurs adaptations à la méthode de [Sorensen_2010] et [Ogden_2011] ont été réalisées : estimation de la corrélation de Spearman, application du peigne d'harmoniques à un peigne de raie pondéré ou non pas la puissance de chaque raie. La méthode finale retenue pour cette thèse consiste alors à estimer la corrélation de Pearson entre le peigne d'harmoniques et un peigne de raies non pondéré. La Figure 124 présente le schéma complet de l'algorithme d'estimation de la distribution d'harmoniques. Cette méthode présente toutefois de fortes limitations en cas de phénomène d'inharmonicité.

La première étape de l'algorithme réalise une **détection des raies** présentes dans la PSD du signal. Seules les raies présentes dans une bande spécifique de fréquence de largeur B et sortant du bruit ambiant peuvent être détectées. Une fonction de décision est estimée et basée sur l'intégration RMS de largeur δ de la PSD. La comparaison des maximums locaux estimés à l'ordre p , de la fonction de décision à un seuil fixé par une probabilité de fausse alarme P_{fa} permet de détecter les raies. Cette étape dépend donc de quatre paramètres : la bande de fréquence étudiée B , l'ordre d'estimation des maximums locaux p , la largeur d'intégration pour l'estimation de la PSD RMS et la probabilité de fausse alarme.

La deuxième étape consiste en la **création d'un peigne de raies** correspondant aux détectations réalisées dans l'étape précédente et de largeur indépendante de la fréquence. Cette étape dépend de plusieurs paramètres : le choix de la résolution fréquentielle pour l'estimation de la fréquence fondamentale Δf , la largeur des raies modélisées par le peigne δf et le type de modélisation pour chaque raie (*Windows*).

La **corrélation de Pearson** entre le peigne de raies de la PSD et un banc de peigne de raies d'harmoniques théoriques est estimée. Une limitation de la fréquence fondamentale $f_{0_{max}}$ est imposée afin de réduire le temps de calcul.

La dernière étape consiste à **identifier la fréquence fondamentale**. Une sélection de fréquences fondamentales potentielles est effectuée par recherche du maximum de la fonction de corrélation. Pour chaque possibilité, le nombre d'harmoniques présents dans la DSP est estimé. Un ensemble de règles permet alors de sélectionner la fréquence fondamentale en fonction : du nombre d'harmoniques et des ratios entre la fréquence d'une part et la corrélation d'autres part, et du potentiel fondamentale à ceux correspondant aux deux maximums de corrélations.

L'**estimation de la distribution en harmoniques** est effectuée en annotant le niveau de la PSD de chaque raie correspondant à une harmonique. En vue des observations réalisées sur l'analyse DEMON dans le chapitre 6, cette détection n'est réalisée qu'uniquement sur le **spectre du signal**.

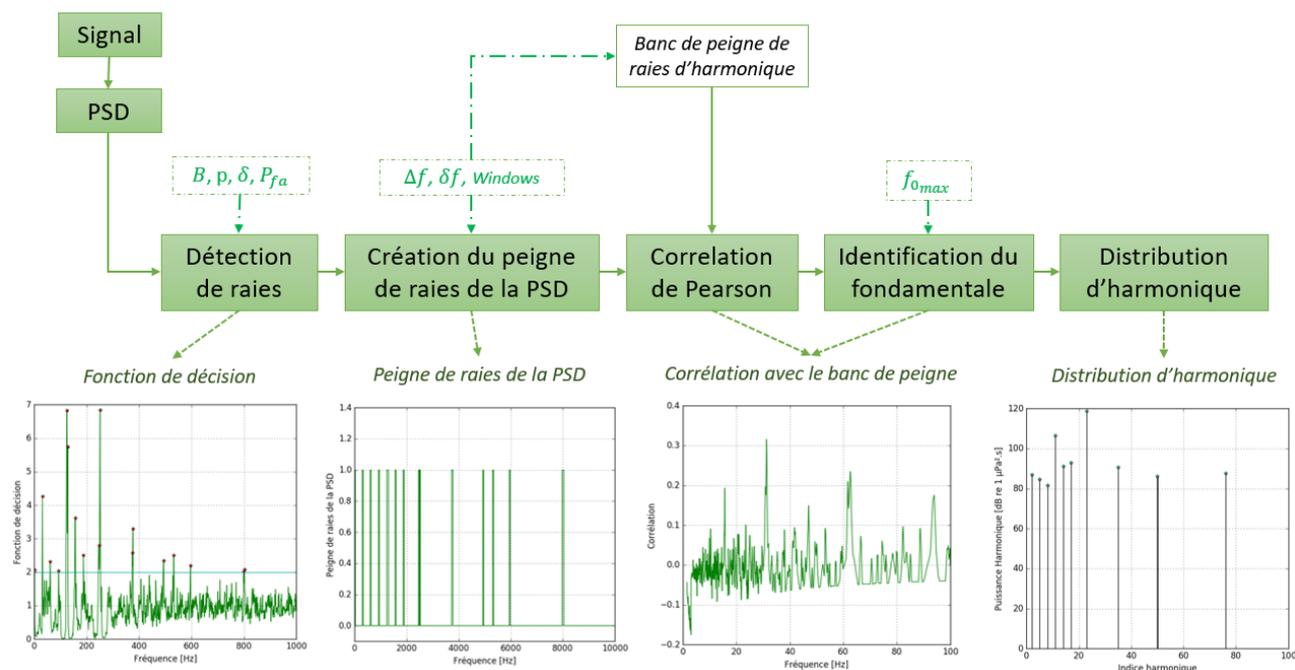


Figure 124 : Schéma de la méthode de estimation de la distribution d'harmoniques

L'application à un ensemble test de la base de données de différentes combinaisons de paramètres a montré de meilleurs résultats en considérant les paramètres présentés dans la Table 83.

Détection des raies				Création un peigne de raies			Corrélation de Pearson
B	ρ	δ	P_{fa}	Δf	δf	Windows	$f_{0_{max}}$
0 à 1 kHz	1	40 Hz	$10^{3/10}$	0,1 Hz	2,5 Hz	Rectangulaire	100 Hz

Table 83 : Paramètres de réglage de l'algorithme d'estimation des distributions d'harmoniques

L'algorithme de détection de rupture spectrale

Différentes méthodes de détection de rupture spectrale apparaissent dans la littérature telle que l'utilisation de la transformation en ondelette discrète [Hitti_1998] ou la modélisation paramétrique [Basseville_1982]. L'algorithme proposé se base sur les travaux de [Basseville_1982] en intégrant l'adaptation proposée par [Andre-Obrecht_1988] et en proposant avec une modification concernant la fonction de décision. Le schéma de la méthode utilisée pour ces travaux est visible sur la Figure 125.

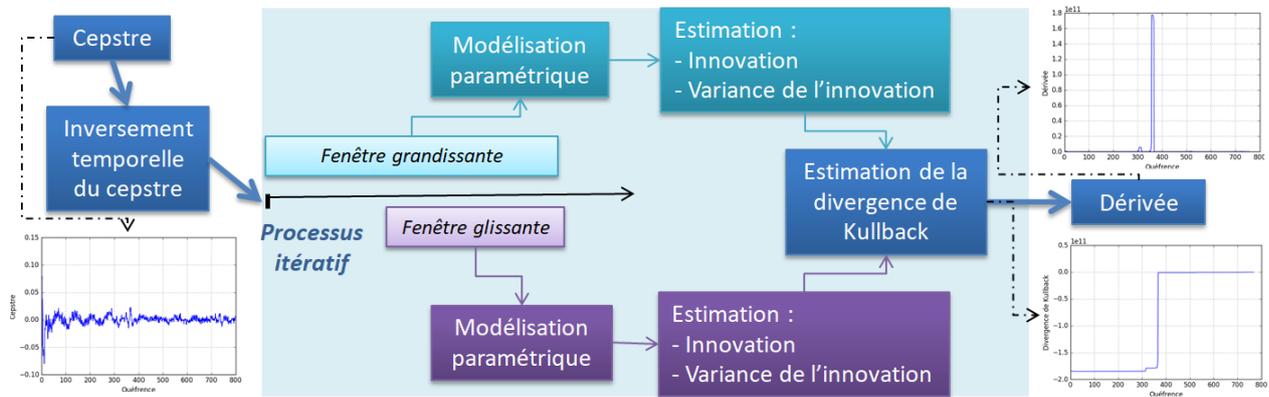


Figure 125 : Schéma de l'algorithme de détection de rupture spectrale

Les travaux de [Basseville_1982] se basent sur la comparaison d'un même signal sur deux fenêtres temporelles différentes. La première fenêtre d'analyse est dite grandissante : sa taille augmente au fur et à mesure que l'on parcourt le signal. La deuxième fenêtre est à taille constante et glissante autour de l'instant considéré. Chaque instant du signal est ainsi analysé. Pour les deux fenêtres d'études, le signal est modélisé en considérant un modèle paramétrique AR. Dans un premier temps, trois distances ont été proposées par [Basseville_1982] pour comparer ces modèles : la distance cepstrale, le logarithme du rapport de vraisemblance et l'entropie croisée. Une quatrième distance est proposée par [Andre-Obrecht_1988] puis réadaptée par [Basseville_1988] : la divergence de Kullback. Ces distances sont estimées en considérant deux métriques :

- L'innovation du signal e_n^i , correspond à la différence entre le signal et sa modélisation.
- La variance de l'innovation du signal σ_i . Cette métrique peut être obtenue par application de la variance ou lors de la résolution de l'équation de Yule-Walker.

Pour cette étude, la distance retenue est la divergence de Kullback qui s'exprime par la formule suivante :

$$T_n = \frac{1}{2} \frac{\sigma_0^2}{\sigma_1^2} + \left(1 + \frac{\sigma_0^2}{\sigma_1^2}\right) \left(\frac{e_n^{0^2}}{2 \cdot \sigma_0^2} - \frac{e_n^0 \cdot e_n^1}{\sigma_1^2}\right)$$

Où l'indice / exposant 0 correspond à la fenêtre grandissante et 1 correspond à la fenêtre glissante.

Dans l'algorithme initial, la divergence de Kullback est sommée pour chaque échantillon. Un seuil permet alors de réaliser une détection sur cette fonction cumulée. A chaque détection, la somme cumulée est réinitialisée. Dans le cas présent, une modification de la méthode de détection est réalisée. La fonction cumulée est estimée sans comparaison avec un seuil ni réinitialisation. Après analyse de l'ensemble du signal, la valeur absolue de la dérivée à l'ordre 10 est estimée. Le maximum de cette fonction correspond alors à l'instant de plus forte rupture spectrale. Un retournement temporel du cepstre est fait avant application de l'algorithme afin de s'affranchir des oscillations fortement marquées en début de cepstre.

Bibliographie

- [Abadie_2012] A. Abadie. *Evolution of Posidonia oceanica meadows in Calvi Bay (Corsica, France) and anchoring effects in Alga Bay*. Master's thesis, University of Aix-Marseille, 2012.
- [Aguilar_Soto_2006] N. Aguilar Soto, M. Johnson, P. T. Madsen, P. L. Tyack, A. Bocconcelli and J. F. Borsani. Does intense ship noise disrupt foraging in deep-diving Cuvier's beaked whales (*Ziphius cavirostris*)?. *Mar. Mammal Sci*, Vol. 22, 690–699, 2006.
- [Allen_2012] J. K. Allen, M. L. Peterson, G. V. Sharrard, D. L. Wright, and S. K. Todd. Radiated noise from commercial ships in the Gulf of Maine: Implications for whale/vessel collisions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.132 (3), 229-235, 2012.
- [Ahmad_2017] J. Ahmad, F. Javed and M. Hayat. Intelligent computational model for classification of sub-Golgi protein using oversampling and fisher feature selection methods. *Artificial Intelligence in Medicine*, Vol 78, 14-22, 2017.
- [American National Standard_2009] American National Standard. *Quantities and Procedures for Description and Measurement of Underwater Sound from Ships – Part 1: General Requirements*. ANSI -ASA S12.64, 2009.
- [Amir_2009] A. Amir, Z. V. A., R. Neta and S. Alon. Wavelet-based acoustic detection of moving vehicles. *Multidimensional Syst. Signal Process.*, Vol. 20(1), 55–80, 2009.
- [Amorim_2006] M.C.P. Amorim. Diversity of sound production in fish. *Communication in fishes*, 2006.
- [Anami_2011] B. S. Anami, V. B. Pagi, and S. M. Magib. Wavelet-based acoustic analysis for determining health condition of motorized two-wheelers. *Applied Acoustics*, Vol. 72 (7), 464-469,2011.
- [Andre-Obrecht_1988] Andre-Obrecht. A new statistical approach for the automatic segmentation of continuous speech signals. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Vol. 36 (1), 1988.
- [Andrew_2002] R. K. Andrew, B. M. Howe, J. A. Mercer and M. A. Dzieciuch. Ocean ambient sound: Comparing the 1960s with the 1990s for a receiver off the California coast. *Acoustics Research Letters Online*, Vol. 3 (2), 65-70, 2002.
- [Andrew_2011] R. K. Andrew, B. M. Howe and J. A. Mercer. Long-time trends in ship traffic noise for four sites of the North American west coast. *The Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 129 (2), 642-651, 2011.
- [Arcangeli_2014] A. Arcangeli, L. David, N. Di Meglio, L. Marini, P. Mayol and A. Moulins. Seasonal variability in cetacean presence in the Pelagos Sanctuary: Implication for conservation purposes", *Abstarct book of the 27th conference of the European cetacean society*, 97-98, 2014.

- [Audaly_2016] C. Audoly, C. Rousset, E. Baudin and T. Folegot. Projet AQUO -Recherche de solutions pour la réduction du bruit sous-marin lié au trafic maritime et son impact sur la faune marine -Synthèse des recommandations. *Conference - Congrès Français d'Acoustique / VISHNO*. 2016
- [Averbuch_2001] A. Averbuch, E. Hulata, V. Zheludev and I. Kozlov. A wavelet packet algorithm for classification and detection of moving vehicles. *Multidimensional Syst. Signal Process*, Vol. 12(1), 9–31, 2001.
- [Averbuch_2009] A. Averbuch, V. A. Zheludev, N. Rabin and A. Schclar. Wavelet-based acoustic detection of moving vehicles. *Multidimensional Systems and Signal Processing*, Vol. 20, (1), 55 – 80, 2009.
- [Averbuch_2011] A. Averbuch, V. Zheludev, P. Neittaanmäki, P. Warttinen, K. Huoman and K. Janson. Acoustic detection and classification of river boats. *Applied Acoustics*, Vol. 72 (1), 22-34, 2011.
- [Arveson_2000] P. T. Arveson and D. J. Vendittis. Radiated noise characteristics of a modern cargo ship. *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 107, 118–129, 2000.
- [Au_1985] W. W. L. Au, D. A. Carder, R. H. Penner and B. L. Scronce. Demonstration of adaptation in beluga whale echolocation signals. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 77, 726-730, 1985.
- [Au_1993] W. W. L. Au. *The Sonar of Dolphins*. Springer, 1993.
- [Audoly_2015] C. Audoly and E. Rizzuto. *Ship Underwater Radiated Noise Patterns*. Technical report, AQUO - Achieve QUIeter Oceans by shipping noise footprint reduction, FP7 - Collaborative Project no 314227, Deliverable R2.9, 2015.
- [Aulanier_2016] Aulanier, F., Simard, Y., Roy, N., Gervaise, C., & Bandet, M. (2016). Spatial-temporal exposure of blue whale habitats to shipping noise in St. Lawrence system, *Fisheries and Oceans Canada, Canadian Science Advisory Secretariat*, 2016.
- [Aulanier_2017] Aulanier, F., Simard, Y., Roy, N., Gervaise, C., & Bandet, M. Effects of shipping on marine acoustic habitats in Canadian Arctic estimated via probabilistic modelling and mapping. *Marine Pollution Bulletin*, Vol 125 (1-2), 115-131, 2017.
- [Bailey_2010] H. Bailey, B. Senior, D. Simmons, J. Rusin, G. Picken and P. M. Thompson. Assessing underwater noise levels during pile-driving at an offshore windfarm and its potential effects on marine mammals. *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 60 (6), 888-897, 2010.
- [Bao_2010] F. Bao, C. Li, X. Wang, Q. Wang and S. Du. Ship classification using nonlinear features of radiated sound: An approach based on empirical mode decomposition. *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 128 (1), 206-214, 2010.

- [Barazzutti_2013] A. Barazzutti, C. Gervaise, Y. Stéphan, F. Dadouchi and J. P. Sessarego. Inversion géo acoustique passive en milieux petits fonds à partir de signaux représentatifs des émissions de cétacés. *Traitement du Signal*, Vol. 30, 169-194, 2013.
- [Barrat_2009] S. Barrat. *Modèles graphiques probabilistes pour la reconnaissance de formes*. *Interface homme-machine [cs.HC]*. Université Nancy II, 2009.
- [Bas_1990] A. H. Bass. Sounds from the Intertidal Zone: Vocalizing Fish. *BioScience*, Vol. 40 (4), 249-258, 1990.
- [Basavaraj_2009] A. S. Basavaraj and P. B. Veerappa. An acoustic signature based neural network model for type recognition of motorcycles, IMPACT-2009. *IEEE international conference on multimedia systems, signal processing and communication technologies*, 28–31, 2009.
- [Basseville_1982] M. Basseville and A. Benveniste. Sequential detection of abrupt changes in spectral characteristics of digital signals. *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 29 (5), 709 – 724, 1983.
- [Basseville_1988] M. Basseville. Detecting Changes in Signals and Systems – A Survey. *Automatica*, Vol 24 (3) 309-326, 1988
- [Bellman_1957] R. Bellman. *Dynamic Programming*. *Princeton University Press*, 1957.
- [Benligiray_2016] B. Benligiray and C. Topal. Blind Rectification of Radial Distortion by Line Straightness. *IEEE Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, 938-942, 2016.
- [Bennasar_2015] M. Bennasar, Y. Hicks and R. Setchi. Feature selection using Joint Mutual Information Maximisation. *Expert Systems with Applications*, Vol. 42 (22), 8520-8532, 2015.
- [Benzécri_1973] P. Benzécri. *L'analyse des données, l'analyse des correspondances*, Vol. 2, 1973.
- [Berenzweig_2001] A. L. Berenzweig and D. P. Ellis, "Locating singing voice segments within musical signals," in Proc. Int. Workshop on Applications
- [Blake_1984] W.K. Blake. Aero-Hydroacoustics for ship. *Rapport technique*, David Taylor Naval Ship Research and Development Center, 1984.
- [Bogert_1963] B. P. Bogert, M. J. R. Healy, and J. W. Tukey. The Quefrency Analysis of Time Series for Echoes: Cepstrum, pseudo-Autocovariance, Cross-Cepstrum, and Saphe-Cracking. *Proceedings of the Symposium on Time Series Analysis* (M. Rosenblatt, Ed) Chapter 15, 209-243. New York: Wiley, 1963.
- [Bouguet_2013] J. Y. Bouguet. Camera Calibration toolbox for Matlab®. *Caltech Technical Report*, California Institute of Technology Computer Vision Research Group, Pasadena, 2013.
- [Bouveyron_2009] C. Bouveyron and S. Girard. Classification supervisée et non supervisée des données de grande dimension. *Revue MODULAD*, N° 40, 91-102, 2009.

- [Brown_1998] J. C. Brown. Musical instrument identification using autocorrelation coefficients. *International Symposium on Musical Acoustics*, 291–295, 1998.
- [Bunin_2008] B. Bunin, A. Sutin, G. Kamberov, H.-S. Roh, B. Luczynski and M. Burlick. Fusion of acoustic measurements with video surveillance for estuarine threat detection. *Proc. SPIE 6945, Optics and Photonics in Global Homeland Security IV*, 694514, 2008.
- [Buckstaff_2004] K.C. Buckstaff. Effects of watercraft noise on the acoustic behaviour of bottlenose dolphins, *Tursiops truncatus*, in Sarasota bay, Florida. *Marine Mammal Science*, 2004.
- [Buscaino_2016] G. Buscaino, M. Ceraulo, N. Pieretti, V. Corrias, A. Farina, F. Filiciotto, V. Maccarrone, R. Grammata, F. Caruso, A. Giuseppe and S. Mazzola. Temporal patterns in the soundscape of the shallow waters of a Mediterranean marine protected area. *Scientific Reports*, Vol.6, Nb. 34230, 2016.
- [Bussers_1976] J.C Bussers, C. Arnould, M. Chardon, M. Desiere, C. Jeuniaux, J. Voss and M.F. Voss-Foucart. Contribution à l’inventaire de la faune marine des fonds de la région de Calvi (Corse). *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège*, 45ème année, n°3-4, 123-135, 1976.
- [Butler_2016] J. Butler, J. A. Stanley and M. J. Butler IV. Underwater soundscapes in near-shore tropical habitats and the effects of environmental degradation and habitat restoration. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, Vol. 479, 89-96, 2016.
- [Bräuer-Burchardt_2001] C. Bräuer-Burchardt and K. Voss. A new algorithm to correct fish-eye and strong-wide-angle-lens-distortion from single images. *Proceedings International Conference on Image Processing, IEEE*, vol.3, 225-228, 2001.
- [Breeding_1996] J.E. Breeding, L.A Pflug, E.L. Bradley, M.H. Walrod and W. McBride. *Research Ambient Noise Directionality (RANDI) 3.1: Physics Description*. Naval Research Laboratory. 1996.
- [Breiman_1984] L. Breiman, J. H. Friedman, R. A. Olshen and C. J. Stone. Classification and Regression Trees. *Wadsworth international group*, Belmont, California, USA, 1984.
- [Breiman_2001] L. Breiman. Random forests. *Machine learning*, Vol. 45 (1), 5–32 2001.
- [Brooker_2015] A. Brooker and V. Humphrey. D2.3 - Noise model for radiated noise/source level (intermediate). Technical report, FP7-314394-SONIC, 2015.

- [Brooker_2016] A. Brooker and V. Humphrey. Measurement of radiated underwater noise from a small research vessel in shallow water. *Ocean Engineering*, Vol. 120, 182-189, 2016.
- [Brown_1998]
- [Casella_2017] E. Casella, A. Collin, D. Harris, S. Ferse, S. Bejarano, V. Parravicini, J. L. Hench and A. Rovere. Mapping coral reefs using consumer-grade drones and structure from motion photogrammetry techniques. *Coral Reefs*, Vol. 36 (1), 269–275, 2017.
- [Cato_1992] D. H. Cato. The biological contribution to the ambient noise in waters near Australia. *Acoustics Australia*, Vol 20 (3), 76-80, 192
- [Cato_2002] D.H. Cato and R.D. McCauley. Australian research in ambient sea noise. *Acoust Aust*, Vol. 30, 14–20, (2002)
- [Cato_2008] D. H. Cato. Ocean ambient noise: its measurement and its significance to marine animals. *Proc. Inst. Acoustics*, Vol.30 (5), 2008.
- [Celeux_1989] G Celeux, E Diday, G Govaert, Y Lechevallier and H. Ralambondrainy. *Classification automatique des données:[environnement statistique et informatique]*. 1989
- [Celeux_1994] G. Celeux and J.-P. Nakache, *Analyse discriminante sur variables qualitatives*, Polytechnica, 1994.
- [Chaitanya_2011] D. E. Chaitanya, Ch. V. Sridevi and G. S. Bhushana Rao. Path loss analysis of underwater communication systems. *Students' Technology Symposium (TechSym), IEEE*, 65-70, 2011.
- [Cheng_2008] J. Cheng, D. Yu and Y. Yang. A fault diagnosis approach for gears based on IMF AR model and SVM. *EURASIP J Advances in Signal Processing*, 2008.
- [Cheveigne_2002] A. de Cheveigné and H. Kawahara. YIN, a fundamental frequency estimator for speech and music. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 111, 1917-1930, 2002.
- [Choe_1996] H. Choe, R. Karlsen, G. Gerhart and T. Meitzler .Wavelet-based ground vehicle recognition using acoustic signals. *Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering, Conference Paper*, 434–445, 1996.
- [Christensen_2008] M. G. Christensen, P. Stoica, A. Jakobsson, and S. H. Jensen. Multi-pitch estimation. *Signal Process*, Vol. 88, 972–983, 2008
- [Chung_2011] K. W. Chung, A. Sutin, A. Sedunov and M. Bruno. DEMON Acoustic Ship Signature Measurements in an Urban Harbor. *Advances in Acoustics and Vibration*, 2011.
- [Cobb_2011] J. Tory Cobb, K. Clint Slatton and Gerald J. Dobeck. A Parametric Model for Characterizing Seabed Textures in Synthetic Aperture Sonar Images. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 35 (2), 2010.

- [Comon_1990] P. Comon. Analyse en composantes indépendantes et identification aveugle. *Traitement du signal*, Vol. 7 (5) 435-450, 1990.
- [Cornuéjols_2011] A. Cornuéjols and L. Miclet. *Apprentissage artificiel: concepts et algorithmes*. Editions Eyrolles, 2011.
- [Costanza_2014] R. Costanza, R. de Groot, P. Sutton, S. der Ploeg, S. J. Anderson, I. Kubiszewski, S Farber and R. K. Turner. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, Vol. 26, 152-158, 2014.
- [Couture_2013] M. Couture. *Suivi Et Quantification Des Pressions Anthropiques En Baie De Calvi*. Master's thesis, university of Corte Pascal Paoli 2013.
- [Clausen_2011] K. T. Clausen, M. Wahlberg, K. Beedholm, S. Dreuiter and P. T. Madsen. Click communication in harbour porpoises phocoena phocoena. *Bioacoustics*, Vol. 20 (1), 2011.
- [Collins_1993] M. Collins. The split-step Padé solution for the parabolic equation method. *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 93(4), 1736–1742, 1993.
- [Coquereau_2015] L. Coquereau, J. Grall, L. Chauvaud, C. Gervaise, J. Clavier, A. Jolivet and L. Di Iorio. Sound production and associated behaviours of benthic invertebrates from a coastal habitat in the north-east Atlantic. *Mar Biol*, 163-127, 2016.
- [Costello_2012] M. J. Costello, S. Wilson and B. Houlding. Predicting total global species richness using rates of species description and estimates of taxonomic effort. *Systematic Biology*, Vol. 61 (5), 871-883, 2012
- [Cox_1994] T. Cox and M. Cox. *Multidimensional scaling*, Chapman & Hall, 1994.
- [Daubechies_1992] I. Daubechies. *Ten Lectures on Wavelets*. SIAM, Philadelphia, 1992
- [Das_2010] A. Das, A. Kumar and R. Bahl. Radiated signal characteristics of marine vessels in the cepstral domain for shallow underwater channel. *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 128 (4), 151–156, 2010.
- [Das_2011] A. Das, A. Kumar, and R. Bahl. Realistic Ambient Noise Analysis for Passive Surveillance Algorithm Design. Underwater Technology. *IEEE Symposium on and 2011 Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies (SSC)*, 1-8, 2011
- [Das_2013] A. Das, A. Kumar and Rajendar Bahl. Marine vessel classification based on passive sonar data: the cepstrum-based approach. *Radar Sonar Navig. IET*, Vol. 7 (1), 87-93, 2013.
- [Davis_1980] S. Davis and P. Mermelstein, "Experiments in syllable-based recognition of continuous speech," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. 28, pp. 357–366, Aug. 1980.
- [Dean_1997] G.B. Deane. Sound generation and air entrainment by breaking waves in the surf zone. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 102 (5), 2671– 2689, 1997.

- [Dean_2010] G.B. Deane et M.D. Stokes. Model calculations of the underwater noise of breaking waves and comparison with experiment. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 127 (6), 3394–3410, 2010.
- [Demoulin_2010] X. Demoulin. Acoustic study of the sea noise. *Annales Hydrographiques*, Vol. 6 (776), 2010.
- [DeMoura_2011] De Moura, N. N., J. M. De Seixas, and Ricardo Ramos. "Passive sonar signal detection and classification based on independent component analysis." *Sonar Systems*. InTech, 2011.
- [Di lorio_2012] L. Di lorio, C. Gervaise, V. Jaud, A. A. Robson and L. Chauvaud. Hydrophone detects cracking sounds: Non-intrusive monitoring of bivalve movement. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, Vol. 432–433, 9-16, 2012.
- [Di lorio_2018] L. Di lorio, X. Raick, E. Parmentier, P. Boissery, C.-A. Valentini-Poirier and C. Gervaise. 'Posidonia meadows calling': a ubiquitous fish sound with monitoring potential. *Remote Sens Ecol Conserv*, 2018.
- [Diaz_2008] R. J. Diaz and R. Rosenberg. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science*, Vol. 321 (5891), 926-929, 2008.
- [Diosi_2005] A. Diosi and L. Kleeman. Advanced sonar and laser range finder fusion for simultaneous localization and mapping. *Intelligent Robots and Systems, 2004. (IROS 2004). Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on*, 1854-1859, 2005.
- [Donnay_2016] A. Donnay. *Le macrobenthos de substrats meubles en zone infralittorale Corse - Indice et méthodologie adaptée pour un diagnostic écologique facilité*. Master's thesis, University of Liège, 2016.
- [Doppler_1843] C. Doppler. Über das farbige Licht der Doppelsterne und einige andere Gestirne des Himmels. *The Proceedings of the Bohemian Society of Sciences*, 1843.
- [Doval_1993] B. Doval and X.Rodet. Fundamental frequency estimation and tracking using maximum likelihood harmonic matching and HMMs. *In International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE*, Vol. 1, 221–224, 1993
- [Dow_1945] M. T. Dow, J. W. Emling and V. O. Knudsen. Survey of underwater sound, Report No. 4, Sounds from surface ships. *Technical report, OSRD, Div. 6.1, NDRC*, 1945 (Declassified Aug. 1960).
- [D'Spain_1999] G. L. D'Spain and W. A. Kuperman. Application of waveguide invariants to analysis of spectrograms from shallow water environments that vary in range and azimuth. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 106 (5), 2454-2468, 1999.
- [Dubois_2007] C. Dubois and M. Davy. Joint detection and tracking of time varying harmonic components: A flexible Bayesian approach. *IEEE Trans. Audio Speech Language Process*. Vol. 15, 1283–1295, 2007.

- [Dupont_2012] J.B. Dupont, P. Bouvet and L. Humbert. Vibroacoustic simulation of an electric motor: Methodology and focus on the structural FEM representativity. *2012 XXth International Conference on Electrical Machines*, IEEE, 2012.
- [Erbe_2000] C. Erbe and D. M. Farmer, Zones of impact around icebreakers affecting beluga whales in the Beaufort Sea. *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 108 (3), 1332-1340, 2000.
- [Erbe_2002] C. Erbe. Underwater noise of whale-watching boats and its effects on killer whales (*Orcinus orca*). *Marine Mammal Science*, Vol.18 (2), 394-418, 2002.
- [Erbe_2008] C. Erbe Critical ratios of beluga whales (*Delphinapterus leucas*) and masked signal duration. *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 124 (4), 2216-2223, 2008.
- [Erbe_2009] C. Erbe. Underwater noise from pile driving in Moreton Bay, Qld. *Acoustics Australia*, 37(3), 87-92, 2009
- [Erbe_2010] C. Erbe. *Underwater Acoustics : Noise and the Effects on Marine Mammals*. 3rd edn.
- [Erbe_2012] C. Erbe, A. MacGillivray and R. Williams. Mapping cumulative noise from shipping to inform marine spatial planning. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 132 (5), 423-428, 2012.
- [Erbe_2013] C. Erbe. Underwater noise of small personal watercraft (jet skis). *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 133, EL326 - EL330, 2013.
- [Erbe_2014] C. Erbe, R. Williams, D. Sandilands and E. Ashe. Identifying Modeled Ship Noise Hotspots for Marine Mammals of Canada's Pacific Region. *Plos one*, Vol.9 (3), e89820-8, 2014.
- [Erbe_2015] C. Erbe, A. Verma, R. McCauley, A. Gavrilov and L. Parnum. The marine soundscape of the Perth Canyon. *Progress in Oceanography*, Vol.137 (A), 38-51, 2015.
- [Erbe_2016] C. Erbe, R. McCauley, A. Gavrilov, S. Madhusudhana and A. Verma. The underwater soundscape around Australia. *Proceedings of ACOUSTICS 2016*, 2016.
- [Espérandieu_1990] J. S. Espérandieu. Prediction of horizontal ambient shipping noise directionality with an analytical model : ANATRA. *In Undersea Defence Technology Conference*, 1990.
- [EuropeanCommission_2008] European Commission. Directive 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council. *Establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy (Marine Strategy Framework Directive)*, 1–22, 2008.
- [EuropeanCommission_2010] European Commission. Commission Decision of 1 September 2010 on criteria and methodological standards on good environmental status of

marine waters (2 010/477/EU). *European Commission (Official Journal of the European Union)*, 1–11, 2010.

- [Ezequiel_2014] C. A. F. Ezequiel, M. Cua, N. C. Libatique, G. L. Tangonan, R. Alampay, R. T. Labuguen, C. M. Favila, J. L. E. Honrado, V. Canos, C. Devaney, A. B. Loreto, J. Bacusmo and B. Palma. UAV Aerial Imaging Applications for Post-Disaster Assessment, Environmental Management and Infrastructure Development. *IEEE Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2014 International Conference on*, 274-283, 2014.
- [Falkowski_1998] Falkowski PG, Barber RT, Smetacek V () Biogeochemical Controls and Feedbacks on Ocean Primary Production. *Science*, Vol. 281, 200–206, 1998.
- [Farrokhrooz_2005_a] M. Farrokhrooz and M. Karimi. Ship noise classification using Probabilistic Neural Network and AR model coefficients. *Oceans 2005 – Europe*, IEEE, 2005.
- [Farrokhrooz_2005_b] M. Farrokhrooz, H. Keivani, H. Rastegar. Marine vessels classification using probabilistic neural network. *Signal Processing and Its Applications 2005*, Proceedings of the Eighth International Symposium on, Vol. 2, 515-518, 2005.
- [Fernández_2005] A. Fernández, J. F. Edwards, F. Rodríguez, A. Espinosa de los Monteros, P. Herráez, P. Castro, J. R. Jaber, V. Martín and M. Arbelo. “Gas and Fat Embolic Syndrome” Involving a Mass Stranding of Beaked Whales (Family Ziphiidae) Exposed to Anthropogenic Sonar Signals. *Vet Pathol*, Vol. 42, 446–457, 2005.
- [Filadelfo_2009] R. Filadelfo, J. Mintz, E. Michlovich, A. D’Amico, P. L. Tyack, and D. R. Ketten. Correlating Military Sonar Use with Beaked Whale Mass Strandings: What Do the Historical Data Show? *Aquatic Mammals*, Vol. 35 (4), 435-444, 2009.
- [Fillinger_2011] L. Fillinger, A. Sutin and A. Sedunov. Acoustic ship signature measurements by cross-correlation method. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 129, 774–778, 2011.
- [Fillinger_2012] L. Fillinger, A. J. Hunter, M. Zampolli and M. C. Clarijs. Passive acoustic detection of closed-circuit underwater breathing apparatus in an operational port environment. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 132 (4), 310-316, 2012.
- [Flynn_2014] Flynn, Kyle F., and Steven C. Chapra. "Remote sensing of submerged aquatic vegetation in a shallow non-turbid river using an unmanned aerial vehicle." *Remote Sensing* 6.12 (2014): 12815-12836.
- [Foote_1997] J. Foote. Content-based retrieval of music and audio. *Multimed.Storage Archiv. Syst.* II , pp. 138–147, 1997.

- [Foote_2004] A.D. Foote, R.W. Osborne, A.R. Hoelzel. Environment: whale-call response to masking boat noise. *Nature*, Vol. 428, 910, 2004.
- [Forrest_1993] T. G. Forrest, G. L. Miller, and J. R. Zagar. Sound propagation in shallow water: implications for acoustic communication by aquatic animals. *Bioacoustics* Vol. 4, 259–270, 1993.
- [Francois_1879a] R. E. Francois and G. R. Garrison. Sound absorption based on ocean measurements. Part I: Pure water and magnesium sulfate contributions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 72, 896-907, 1982.
- [Francois_1879b] R. E. Francois and G. R. Garrison. Sound absorption based on ocean measurements. Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 72, 1879-1890, 1982.
- [Garcia_2006] J. Garcia, A. Barbedo and A.Lopes. Automatic Genre Classification of Musical Signals. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2006.
- [Geay_2017] T. Geay, P. Belleudy, C. Gervaise, H. Habersack, J. Aigner, A. Kreisler, H. Seitz and J. B. Laronne. Passive acoustic monitoring of bed load discharge in a large gravel bed river. *Journal of Geophysical research*. Vol 122 (2), 528-545, 2017.
- [Gervaise_2012a] C. Gervaise, B. G. Kinda, J. Bonnel, Y. Stéphan and S. Vallez. Passive geoacoustic inversion with a single hydrophone using broadband ship noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 131 (3), 2012.
- [Gervaise_2012b] C. Gervaise, Y. Simard, N. Roy, B. Kinda and N. Ménard. Shipping noise in whale habitat: Characteristics, sources, budget, and impact on belugas in Saguenay–St. Lawrence Marine Park hub. *The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 132, 76–89, 2012.
- [Gervaise_2015] C. Gervaise, F. Aulanier, Y. Simard and N. Roy. Mapping probability of shipping sound exposure level. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 137 (6), 429-435, 2015.
- [Gigault_2016] J. Gigault, B. Pedrono, B. Maxitb and Al. Ter Hallec. Marine plastic litter: the unanalyzed nano-fraction. *Environ. Sci.: Nano*, Vol. 3, 346-350, 2016.
- [Girard_2000] S. Girard. A nonlinear PCA based on manifold approximation. *Computational Statistics*, Vol. 15(2), 145–167, 2000.
- [Goldstein_2012] M. C. Goldstein, M. Rosenberg, L. Cheng. Increased oceanic microplastic debris enhances oviposition in an endemic pelagic insect. *Biol. Lett.* 2012
- [Gordon_2003] J. Gordon, D. Gillespie, J. Potter, A. Frantzis, M. P. Simmonds, R. Swift and D. Thompson, David. A Review of the Effects of Seismic Surveys on Marine Mammals. *Marine Technology Society Journal*, Vol. 37, (4), 16-34, 2003.
- [Goto_1998] M. Goto and Y. Muraoka. Music understanding at the beat level: Real-time beat tracking of audio signals. in *Computational Auditory Scene Analysis*, 1998, pp. 157–176.

- [Gray_1980] L. M. Gray and D. S. Greeley. Source level model for propeller blade rate radiation for the world's merchant fleet. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 67, 516-522, 1980.
- [Greene_1987] C. R. Jr Greene. Characteristics of oil industry dredge and drilling sounds in the Beaufort Sea. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.82, 1315 -1324, 1987.
- [Guan_2015] S. Guan, T.H. Lin, L.S. Chou, J. Vignola, J. Judge and D. Turo. Dynamics of soundscape in a shallow water marine environment: A study of the habitat of the Indo-Pacific humpback dolphin. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 137, 2939–2949, 2015.
- [Guo_2004] J. Guo, E. S. Chng and D. Rajan. Foreground motion detection by difference-based spatial temporal entropy image. *In Proc. IEEE Region 10 Conf. (TenCon 2004)*, 379–282, 2004.
- [Guo_2008] B. Guo, M. Nixon, and T. Damarla. Acoustic information fusion for ground vehicle classification. *Information Fusion*, 2008.
- [Guyon_2002] Guyon, Isabelle, et al. "Gene selection for cancer classification using support vector machines." *Machine learning* 46.1-3, 2002, 389-422.
- [Guyon_2003] Guyon, Isabelle, and André Elisseeff. An introduction to variable and feature selection. *Journal of machine learning research*, 1157-1182, 2003.
- [Halpern_2008] Halpern B S, Walbridge S, Selkoe K A, Kappel C V, Micheli F, D'agrosa C, Bruno J F, Casey K S, Ebert C, Fox H E, Fujita R, Heinemann D, Lenihan H S, Madin E M P, Perry M T, Selig E R, Spalding M, Steneck R & Watson R. A Global Map Of Human Impact On Marine Ecosystems. *Science*, Vol. 319 (5865), 948-952, 2008.
- [Hamson_1997] R. M. Hamson. The modelling of ambient noise due to shipping and wind sources in complex environments. *Applied Acoustics*, Vol. 51 (3), 251-287, 1997.
- [Hastie_1989] T. Hastie and W. Stuetzle. Principal curves. *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 84, 502–516, 1989.
- [Hawkins_2017] A. D. Hawkins and A. N. Popper. A sound approach to assessing the impact of underwater noise on marine fishes and invertebrates. *ICES Journal of Marine Science*, Vol. 74 (3), 635–651, 2017.
- [Haxel_2013] J.H. Haxel, R. P. Dziak, and H. Matsumoto. Observations of shallow water marine ambient sound: The low frequency underwater soundscape of the central Oregon coast. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 133, 2586-2596, 2013.
- [Henderson_2012] D. Henderson and R. P. Hamernik. The use of kurtosis measurement in the assessment of potential noise trauma. *Noise-Induced Hearing Loss: Scientific Advances*, 41–55, 2012.
- [Henthorn_2007] R. Henthorn, D. W. Caress, H. Thomas, R. McEwen, W. J. Kirkwood, C. K. Paull and R. Keaten. High-Resolution Multibeam and Subbottom Surveys of

- Submarine Canyons, Deep-Sea Fan Channels, and Gas Seeps Using the MBARI Mapping AUV. *OCEANS 2006*, IEEE, 2007.
- [Herbrich_2000] R. Herbrich, T. Graepel, and K. Obermayer. Large margin rank boundaries for ordinal regression. *Advance in Large Margin Classifiers*, pp 115–132, 2000.
- [Hermannsen_2014] High frequency components of ship noise in shallow water with a discussion of implications for harbor porpoises (*Phocoenaphocoena*). L. Hermannsen, K. Beedholm, J. Tougaard and P. T. Madsen. *J Acoust. Soc. Am. Vol. 136* (4), 2014.
- [Hildebrand_2009] J. A. Hildebrand. Antropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean. *Marine Ecology Progress Series*, Vol 395(5), 2009.
- [Hitti_1998] E. Hitti and M. F. Lucas. Wavelet-packet basis selection for abrupt changes detection in multicomponent signals. 9th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 1998), 1998.
- [Hoegh-Guldberg_2007] O. Hoegh-Guldberg, P. J. Mumby, A. J. Hooten, R. S. Steneck, P. Greenfield, E. Gomez, C. D. Harvell, P. F. Sale, A. J. Edwards, K. Caldeira, N. Knowlton, C. M. Eakin, R. Iglesias-Prieto, N. Muthiga, R. H. Bradbury, A. Dubi, M. E. Hatzioios. Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification. *Science*, Vol. 318 (5857), 1737-1742, 2007.
- [Hohil_2003] M. E. Hohil, J. R. Heberley, J. Chang and A. Rotolo. Vehicle counting and classification algorithms for unattended ground sensors. *E. M. Carapezza*, 5090(1), 99–110, 2003.
- [Hotelling_1933] H. Hotelling. Analysis of a complex of statistical variables into principal components. *Journal of Educational Psychology Vol. 24* (6), 417-441, 1933.
- [Hughes_1990] S. J. Hughes, D. D. Ellis, D. M. F. Chapman and P. R. Staal. Low-frequency acoustic propagation loss in shallow water over hard-rock seabeds covered by a thin layer of elastic–solid sediment. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 88 (283), 1990.
- [InternationalMaritimeOrganization_2001] International Maritime Organization. *Resolution A.917(22): guidelines for the onboard operational use of shipborne automatic identification systems (AIS)*, 2001.
- [International Standardization Organization_2016] International Standardization Organization. *Acoustics - Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships. Part 1: General requirements for measurements in deep water. ISO/PAS 17208-1*, 2012.
- [International Standardization Organization_2012] International Standardization Organization. *Underwater acoustics — Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships —Part 1: Requirements for precision measurements in deep water used for comparison purposes, ISO 17208-1*, 2016.

- [Imani_2015] M. Imani and H. Ghassemian. Feature space discriminant analysis for hyperspectral data feature reduction. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 102, 1-13, 2015.
- [IISE_2009] IISE. *State of observed species*. Tech. rep., Arizona State University, 2009.
- [IISE_2010] IISE. *State of observed species*. Tech. rep., Arizona State University, 2010.
- [IISE_2011] IISE. *State of observed species*. Tech. rep., Arizona State University, 2011.
- [Izenman_2013] A.J. Izenman. *Linear Discriminant Analysis*. In: *Modern Multivariate Statistical Techniques*. Springer Texts in Statistics. Springer, New York, NY, 2013.
- [Jensen_2009] F. H. Jensen, L. Bejder, M. Wahlberg, N. Aguilar Soto, M. Johnson and P. T. Madsen. Vessel noise effects on delphinid communication. *Marine Ecology Progress, Ser.395* , 161–175, 2009.
- [Josso_2009] Josso, N. F., Ioana, C., Mars, J. I., Gervaise, C., and Stéphan, Y. On the consideration of motion effects in the computation of impulse response for underwater acoustics inversion. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 126(4), 1739–1751, 2009.
- [Kannala_2006] J. Kannala and S. S. Brandt. A Generic Camera Model and Calibration Method for Conventional, Wide-Angle, and Fish-Eye Lenses. *IEEE Transactions in pattern analysis and machine intelligence*, vol. 28, 1335-1340, 2006.
- [Karmann_1990] K. P. Karmann and A. Von Brandt. Moving object recognition using an adaptive background memory. *Time-Varying Image Processing and Moving Object Recognition, In Cappellini, V.*, Vol. 2, 289–307, 1990.
- [Kastelein_2006] R.A. Kastelein, N. Jennings and W.C. Verboom. Differences in the response of a striped dolphin (*Stenella coeruleoalba*) and a harbour porpoise (*Phocoena phocoena*) to an acoustic alarm. *Marine Environmental Research*, Vol. 61, 363-378, 2006.
- [Khandoker_2007] A. Khandoker, D. Lai, R. Begg and M. Palaniswami. Wavelet-based feature extraction for support vector machines for screening balance impairments in the elderly. *Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on*, Vol. 15(4), 587–597, 2007.
- [Kie_1999] E. B. Kie. Analysis of acoustic signatures from moving vehicles using time varying auto regressive models. *J Multidimensional Signals Signal Process*, Vol.10(4), 357–78, 1999.
- [Kim_2008] S. Kim, L. Holmstrom and J. McNames. Multiharmonic tracking using marginalized particle filters. *Proceedings of the 30th Annual International Conference of the IEEE*, 29–33, 2008.
- [Kim_2009] Y. Kim, S. Jeong, D. Kim and T. S. Lopez. An efficient scheme of target classification and information fusion in wireless sensor networks. *Personal Ubiquitous Comput.*, Vol.13(7), 499–508, 2009.

- [Kim_2017] C. Kim and H.-y. Kim. An Improved SVM-T-RFE Based on Intensity-Dependent Normalization for Feature Selection in Gene Expression of Big-Data. *IT Convergence and Security*, Vol. 449, 44-51, 2017.
- [Kimber_1996] D. Kimber and L. Wilcox, "Acoustic segmentation for audio browsers," in Proc. Interface Conf., Sydney, Australia, July 1996.
- [Kinda_2013a] B. Kinda. *Acoustic remote sensing of Artic Sea Ice from long term-soundscape measurements*. Ph. D. thesis, University of Grenoble, 2013.
- [Kinda_2013b] G. B. Kinda, Y. Simard, C. Gervaise, J. Mars and L. Fortier. Under-ice ambient noise in Eastern Beaufort Sea, Canadian Arctic, and its relation to environmental forcing. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 134 (1) 77-87, 2013.
- [Kinda_2015] G. B. Kinda, Y. Simard, C. Gervaise, Jérôme I. Mars and Louis Fortier. 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*, Vol. 138, 2034 -2045, 2015.
- [Kummert_1993] A. Kummert. Fuzzy technology implemented in sonar systems. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 18 (4), 483 – 490, 1993.
- [Kostaschuk_2005] R. Kostaschuk, J. Best, P. Villard, J. Peakall and M. Franklin. Measuring flow velocity and sediment transport with an acoustic Doppler current profiler. *Geomorphology*, Vol. 68 (1–2), 25-37, 2005.
- [Kotsiantis_2007] S. B. Kotsiantis, I. Zaharakis, & P. Pintelas. Supervised machine learning: A review of classification techniques. *Emerging artificial intelligence applications in computer engineering*, 160, 3-24, 2007.
- [Kudryavtsev_2003] A. A. Kudryavtsev, K. P. Luginets and A. I. Mashoshin. Amplitude modulation of underwater noise produced by seagoing vessels. *Acoustical Physics*, Vol. 49 (2), 184–188, 2003.
- [Kukelova_2011] Z. Kukelova and T. Pajdla. A Minimal Solution to Radial Distortion Autocalibration, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.33 (12), 2410-2422, 2011.
- [Krause_1987] B. Krause. Bioacoustics, habitat ambience in ecological balance. *Whole Earth Review*, 1987.
- [Kramer_2001] S. Kramer, G. Widmer, B. Pfahringer, and M. DeGroeve. Prediction of ordinal classes using regression trees. *Fundamenta Informaticae*, 47 , pp.1–13, 2001.
- [Labat_2015] V. Labat and D. Dare. Analyse de signaux acoustiques marins: identification de fréquences caractéristiques via la méthode DEMON. *Congrès Français d'Acoustique*, 345-350, 2014.

- [Ladich_2014] F. Ladich. Fish bioacoustics. *Current Opinion in Neurobiology*, Volume 28, 121-127, 2014.
- [Lagardère_2002] J.P. Lagardère. Effects of noise on growth and reproduction of Crangon crangon in rearing tanks. *Marine Biology*, Vol. 71, 177-185, 1982.
- [Laroche_2001] J. Laroche. Estimating tempo, swing and beat locations in audio recordings. Proc. Int. Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics WASPAA, pp. 135–139, 2001.
- [Laures_2015] R. Laures. Effets et influences des champs magnétiques sur la cavitation. *Technical Rapport*, JaTech TM, 2015.
- [Lebot_a_2015] O. Lebot. *Détection, localisation, caractérisation de transitoires acoustiques sous-marins*. PhD's thesis, university of Grenoble, 2014.
- [LeBot_b_2015] O. Le Bot, J.I.Mars, C.Gervaise and Y.Simard. Rhythmic analysis for click train detection and source separation with examples on beluga whales. *Applied Acoustics*, Vol. 95, 37-49, 2015.
- [LeCourtois_2017] Le Courtois, F., Kinda, G. B., Boutonnier, J.-M., Stephan, Y., & Sarzeaud, O. (2016). Statistical ambient noise maps from traffic at world and basin scales. *Acoustic and Environmental Variability, Fluctuations and Coherence*, Vol. 38, 211–221, 2017.
- [Lefèbvre_2017] L. Lefèbvre. *Etudes macroscopique et microscopique et formation des aegagropiles de Posidonia oceanica*. Master's thesis, University of Liège, 2017.
- [Legendre_1989] Legendre L, Gosselin M. New production and export of organic matter to the deep ocean: consequences of some recent discoveries. *Limnol Oceanogr* Vol. 34, 1374–1380, 1989.
- [Lennartsson_2000] R. K. Lennartsson, J. W. C. Robinson, L. Persson, M. J. Hinich, and S. McLaughlin. Passive sonar signature estimation using bispectral techniques. *Proceedings of the Tenth IEEE Workshop on Statistical Signal and Array Processing. Piscataway, IEEE*, 281–285, 2000.
- [Leroy_1981] C. Leroy and C. Martinez. Effet combine de la température et de la pression sur l'absorption du son dans les couches profonds. *GRETSI, Groupe d'Etudes du Traitement du Signal et des Images*, 1981.
- [Li_a_2000] G. Li and A. Khokar. Content-based indexing and retrieval of audio data using wavelets. *Proc. Int. Conf. Multimedia Expo II*, pp.885–888, 2000.
- [Li_b_2000] S. Li. Content-based classification and retrieval of audio using the nearest feature line method. *IEEE Trans. Speech Audio Processing*, vol. 8, pp. 619–625, 2000.
- [Li_c_2000] H. Li, P. Stoica and J. Li. Computationally efficient parameter estimation for harmonic sinusoidal signals. *Signal Process*, Vol. 80, 1937–1944, 2000

- [Li_2002] D. Li, K. Wong, Y. H. Hu and A. Sayeed. Detection, classification, and tracking of targets. *Signal Processing Magazine, IEEE*, Vol. 19(2), 17–29, 2002.
- [Li_2017] F. Li, D. Miaoa and W. Pedrycz. Granular multi-label feature selection based on mutual information. *Pattern Recognition*, Vol. 67, 410-423, 2017.
- [Li_2018] L. Li, H. Ge, Y. Tong and Y. Zhang. Face Recognition Using Gabor-Based Feature Extraction and Feature Space Transformation Fusion Method for Single Image per Person Problem. *Neural Processing Letters*, Vol. 47 (3), 1197–1217, 2018.
- [Liu_1998] H. Liu, T. H. Hong, M. Herman and R. Chellappa. Accuracy vs. efficiency trade-offs in optical flow algorithms. *Computer Vision and Image Understanding*, Vol.7 (3), 271–286, 1998.
- [Liu_1999] L. Liu. *Ground vehicle acoustic signal processing based on biological hearing models*. Master's thesis, University of Maryland, 1999.
- [Liu_2005] LIU, Huan et YU, Lei. Toward integrating feature selection algorithms for classification and clustering. *IEEE Transactions on knowledge and data engineering*, 2005, vol. 17, no 4, p. 491-502.
- [Liu_2015] X. Liu, L. Ma, L. Song, Y. Zhao, X. Zhao and C. Zhou. Recognizing Common CT Imaging Signs of Lung Diseases Through a New Feature Selection Method Based on Fisher Criterion and Genetic Optimization. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, Vol.19 (2), 635-647, 2015.
- [Lillis_2014] A. Lillis, D. B. Eggleston and D.W. R. Bohnenstiehl. *Estuarine soundscapes: distinct acoustic characteristics of oyster reefs compared to soft-bottom habitats*, Mar Ecol Prog Ser Vol.505, 1–17, 2014.
- [Lobel_2010] P.S. Lobel, I.M. Kaatz and A.N. Rice. Acoustical behavior of coral reef fishes. *Reproduction and sexuality in marine fishes: evolutionary patterns and innovations*, 307–386, 2010.
- [Logan_2000] B. Logan. Mel frequency cepstral coefficients for music modelling. *Proc. Int. Symp. Music Information Retrieval (ISMIR)*, 2000
- [Lossent_2017] J. Lossent, L. Di Iorio, C.A. Valentini-Poirier, P. Boissery and C. Gervaise. Mapping the diversity of spectral shapes discriminates between adjacent benthic biophonie. *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 585, 31-48, 2017.
- [Lourens_1987] J. Lourens and M. Coetzer. Detection of mechanical ship features from underwater acoustic sound. *Acoustics, Speech, and Signal Processing*, IEEE International Conference on ICASSP '87, 1987.
- [Lourens_1988] J. G. Lourens, "Classification of ships using underwater radiated noise", Proc. COMSIG 88 Conf., pp. 130-134, 1988.
- [Lovella_2006] J.M. Lovella, M.M. Findlay, J.R. Nedwell and M.A. Pegg. The hearing abilities of the silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) and bighead carp

- (*Aristichthys nobilis*). *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, Vol. 143 (3), 286-291, 2006.
- [Lowerre-Barbieri_2008] S. K. Lowerre-Barbieri, L. R. Barbieri, J. R. Flanders, A. G. Woodward, C. F. Cotton and M. Kathryn Knowlton. Use of Passive Acoustics to Determine Red Drum Spawning in Georgia Waters. *Transactions of the American Fisheries Society*, Vol. 137, 562–575, 2008.
- [Luczkovich_2008] J. J. Luczkovich, D. A. Mann and R. A. Rountree. Passive Acoustics as a Tool in Fisheries Science. *Transactions of the American Fisheries Society*, Vol. 137, 533–541, 2008.
- [Ma_2005] B. B. Ma, J. A. Nystuen and R. C. Lien. Prediction of underwater sound levels from rain and wind. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 117 (6), 3555-3565, 2005.
- [Maaten_2008] L.J.P. van der Maaten, E.O. Postma, and H.J. van den Herik. Dimensionality reduction : A comparative review. *Neurocognition*, 2008.
- [Magnier_2016a] Magnier, C., Gervaise, C., Pelaprat, C., Bourdon, R., Dufrechou, L., Simon, L. 2016. Contribution of the ship noises on the soundscape of the bay of Calvi during summer. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, vol. 27, 2016.
- [Magnier_2016b] Magnier, C., Gervaise, C., Pelaprat, C., Bourdon, R., Dufrechou, L., Simon, L. 2016. Study of ship radiated noise effects on aquatic life during summer in the Calvi bay, conférence "effet of noise on aquatique live", Dublin, 10 au 15 juillet 2016.
- [MacGillivray_2006] A. O. MacGillivray. *A acoustic modelling study of seismic airgun noise in queen charlotte basin*. M. SC. Thesis, University of Victoria, B. C.
- [Maciejewski_1997] H. Maciejewski, J. Mazurkiewicz, K. Skowro, and T. Walkowiak. Neural networks for vehicle recognition. *In Proc. 6th Conference on Microelectronics for Neural Networks, Evolutionary and Fuzzy System*, 1997.
- [Madsen_2002] P. Madsen, M. Wahlberg and B. Møhl. Male sperm whale (*Physeter macrocephalus*) acoustics in a high-latitude habitat: implications for echolocation and communication. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, Vol. 53 (1), 31–41, 2002.
- [Mairaj_2011] A. Mairaj. Detection and Identification of an Aircraft by Processing its Acoustic Signature. *Net. and Elect. Engin., Intern. Conf. On*, No.1, 105-109, 2011.
- [Marques_2013] T. A. Marques, L. Thomas, S. W. Martin, D. K. Mellinger, J. A. Ward, D. J. Moretti, D. Harris and P. L. Tyack. Estimating animal population density using passive acoustics. *Biological reviews*, Vol. 88, 287–309, 2013.
- [Mathias_2016] D. Mathias, C. Gervaise and L. Di Iorio. Wind dependence of ambient noise in a biologically rich coastal area. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 139 (2) 839-850, 2016.

- [Mathieu-Dupas_2010] Eve Mathieu-Dupas. Algorithme des k plus proches voisins pondérés et application en diagnostic. *42èmes Journées de Statistique*, 2010, Marseille, France, France. 2010
- [Matzner_2010] S. Matzner, A. Maxwell, J. Myers, K. Caviggia, J. Elster, M. Foley, M. Jones, G. Ogden, E. Sorensen, L. Zurk, J. Tagestad, A. Stephan, M. Peterson and D. Bradley. Small vessel contribution to underwater noise. *OCEANS 2010, IEEE*, 2010
- [Mazarakis_2007] G. P. Mazarakis and J. N. Avaritsiotis. Vehicle classification in sensor networks using time-domain signal processing and neural networks. *Microprocess.Microsyst*, Vol 31(6), 381–392, 2007.
- [McCulloch_1943] W.S. McCulloch and W. Pitts. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The bulletin of mathematical biophysics*, Vol. 5 (4), 115–133, 1943.
- [McDonald_2006] M.A. McDonald, J.A. Hildebrand and S.M. Wiggins. Increases in deep ocean ambient noise in the Northeast Pacific west of San Nicolas Island, California. *The Journal of the Acoustical Society of America.*, Vol. 120 (2), 711-718, 2006.
- [McDonald_2008] M.A. McDonald, J.A. Hildebrand, S.M. Wiggins, D. Ross. A 50 year comparison of ambient ocean noise near San Clemente Island: a bathymetrically complex coastal region off Southern California. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 124 (4), 1985-1992, 2008.
- [McKenna_2000] S. J. McKenna, S. Jabri, Z. Duric, H. Wechsler and A. Rosenfeld. *Tracking groups of people*. *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 80(1), 42–56, 2000.
- [McKenna_2011] M. F. McKenna, D. Ross, S. M. Wiggins and J. A. Hildebrand. Underwater radiated noise from modern commercial ships. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.131 (1), 92–103, 2011.
- [McKenna_2013] M.F. McKenna, S.M. Wiggins, J.A. Hildebrand. Relationship between container ship underwater noise levels and ship design, operational and oceanographic conditions. *Sci. Rep.*, Vol.3, 1760, 2013.
- [McWilliam_2013] J.N. McWilliam and A.D. Hawkins. A comparison of inshore marine soundscapes. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, Vol.446, 166-176, 2013.
- [Meignen_2007] S. Meignen and V. Perrier. A New Formulation for Empirical Mode Decomposition Based on Constrained Optimization. *IEEE Signal Processing Letters*. Vol 14 (12), 932 – 935, 2007.
- [Mellinger_2007] D. K. Mellinger, K. M. Stafford, S. E. Moore, R. P. Dziak and H. Matsumoto. An Overview of Fixed Passive Acoustic Observation Methods for Cetaceans. *Oceanography*, Vol. 20 (4), 36-45, 2007.

- [Merchant_2013] N.D. Merchant, T.R. Barton, P.M. Thompson, E. Pirotta, D.T. Dakin and J. Dorocicz. Spectral probability density as a tool for ambient noise analysis. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 133, no. 4, 2013.
- [Merchant_2014] N.D. Merchant, E. Pirotta, T. R.Barton and P. M.Thompson. Monitoring ship noise to assess the impact of coastal developments on marine mammals. *Marine Pollution Bulletin*, Vol.78, 85-95, 2014.
- [Merchant_2015] N.D Merchant, K.M. Fristrup, M.P. Johnson, P.L. Tyack, M.J. Witt, P. Blondel and S.E. Parks. Measuring acoustic habitats. *Methods Ecol. Evol.*, Vol. 6 (3), 257 – 265, 2015.
- [Merchant_2016] N. D. Merchant, K. L. Brookes, R. C. F., A. W. J. Bicknell, B. J. Godley & M. J. Witt. Underwater noise levels in UK waters. *Scientific Reports*, Vol.6, Nb. 36942, 2016.
- [Micusik_2003] B. Micusik and T. Pajdla. Estimation of omnidirectional camera model from epipolar geometry. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Proceedings*, Vol. 2, 2003.
- [Miksis-Olds_2011] J. L. Miksis-Olds and T. Wagner. Behavioral response of manatees to variations in environmental sound levels. *Marine Mammal Science*, Vol. 27 (1), 130-148, 2011.
- [Miles_1987] P. R. Miles, C. I. Malme, W. J. Richardson. *Prediction of drilling site-specific interaction of industrial acoustic stimuli and endangered whales in the Alaskan Beaufort Sea*. BBN, 1987.
- [Moore_1997] Moore and Glasberg. A model for the prediction of thresholds, loudness and partial loudness. *J.Audio.Eng.Soc.*, Vol 45, 224–240, 1997.
- [Munich_2004] M. E. Munich. Bayesian subspace methods for acoustic signature recognition of vehicles. *Proc.EUSIPCO*, 2004.
- [Murphy_1976] E. Murphy and O. V. Olesen. Intensity–range relations for shallow-water sound propagation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 59, 305-311, 1976.
- [Nedwell_2007] J.R Nedwell et al. A validation of the dBht as a measure of the behavioural and auditory effects of underwater noise, *Subacoustech Report N.534R1231*, 2007.
- [Nehorai_1986] A. Nehorai and B. Porat. Adaptive comb filtering for harmonic signal enhancement. *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process*, Vol. 34, 1124 – 1138, 1986
- [Nielsen_1999] R. O. Nielsen. Cramer-Rao lower bounds for sonar broadband modulation parameters. *IEEE Journal of Ocean Engineering*, vol. 24 (3), 285-290, 1999.
- [Nielsen_2009] R. O. Nielsen. Acoustic detection of low flying aircraft. *IEEE published in echnologies for Homeland Security, 2009. HST '09. IEEE Conference*, 101 – 106, 2009.

- [Nomura_1992] Y. Nomura, M. Sagara, H. Naruse and A. Ide, Simple calibration algorithm for high-distortion lens camera. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 14 (11), 1095 – 1099, 1992.
- [Nooralahiyan_1998] A. Y. Nooralahiyan, H. R. Kirby and D. McKeown. Vehicle classification by acoustic signature. *Mathematical and computer modeling*, Vol. 27, 9 – 11, 1998.
- [NRC_1995] National Research Council. *Wetlands: Characteristics and boundaries*. National Academies Press, 1995.
- [Ogden_2011] G. L. Ogden, L. M. Zurk, M. E. Jones, and M. E. Peterson. Extraction of small boat harmonic signatures from passive sonar. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 129, 3768–3776, 2011.
- [Oliver_2000] N. Oliver, B. Rosario and A. Pentland. A Bayesian computer vision system for modeling human interactions. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 22(8), 831–843, 2000.
- [Oudompheng_2015] B. Oudompheng. *Localisation et contribution de sources acoustiques de navire au passage par traitement d'antenne réduite*. PhD's thesis, university of Grenoble, 2015.
- [Parmentier_2010] E. Parmentier, G. Bouillac, B. Dragičević, J. Dulčić and M. Fine. Call properties and morphology of the sound-producing organ in *Ophidion rochei* (Ophidiidae). *Journal of Experimental Biology*, Vol. 213, 3230-3236, 2010.
- [Parmentier_2016] E. Parmentier and M.L. Fine. Fish Sound Production: Insights. *Vertebrate Sound Production and Acoustic Communication*. Springer Handbook of Auditory Research, Vol.53, 2016.
- [Parmentier_2017] E. Parmentier, L. Di Iorio, M. Picciulin, S. Malavasi, J.-P. Lagardère and F. Bertucci. Consistency of spatiotemporal sound features supports the use of passive acoustics for long-term monitoring. *Animal Conservation*, Vol. 21 (3) 2017.
- [Parks_2007] SE Parks, CW Clark and PL Tyack. Short-and long-term changes in right whale calling behavior: the potential effects of noise on acoustic communication. *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 122, 3725-3731, 2007.
- [Parks_2014] S.E. Parks, J.L. Miksis-Olds and S.L. Denes. Assessing marine ecosystem acoustic diversity across ocean basins. *Ecological Informatics*. Vol. 21, May 2014, 81-88, 2014.
- [Pavlenko_2001] T. Pavlenko and D. Von Rosen. Effect of dimensionality on discrimination. *Statistics*, Vol. 35(3), 191–213, 2001.
- [Pavlenko_2003] T. Pavlenko. On feature selection, curse of dimensionality and error probability in discriminant analysis. *Journal of Statistical Planning and Inference*, Vol. 115, 565–584, 2003.

- [Peeters_2004] G. Peeters. *A large set of audio features for sound description (similarity and classification) in the cuidado project*. Rapport Technique, IRCAM, 2004.
- [Peigné_2016] A. Peigné. Holographie adaptative pour la réalisation de capteurs à fibres optiques de très grande sensibilité : application à la détection d'ondes acoustiques sous-marines. Ph. D thesis, Université de Nice-Sophia Antipolis, 2016.
- [Pelaprat_2000] C. Pelaprat .*Le cantonnement de pêche, un véritable outil de gestion ? Exemple du cantonnement de pêche de Calvi (Corse, Méditerranée nord-occidentale)*. Master's thesis, University of Corsica, 2000.
- [Pieretti_2011] N. Pieretti, A. Farina, D. Morri. A new methodology to infer the singing activity of an avian community: the Acoustic Complexity Index (ACI). *Ecol. Indic.*, Vol. 11 (3), 868-873, 2011.
- [Pijanowski_2011] B. C. Pijanowski, A. Farina , S. H. Gage, S. L. Dumyahn and B.L. Krause. hat is soundscape ecology? An introduction and overview of an emerging new science. *Landscape Ecology*, Vol.26, (9), 1213–1232, 2011.
- [Plesset_1977] M.S. Plesset and A. Prosperetti. Bubble dynamics and cavitation. *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 9 (1), 145–185, 1977.
- [Pollara_2016] A. Pollara, A. Sutin and H.y Salloum. Improvement of the Detection of Envelope Modulation on Noise (DEMON) and its application to small boats. *OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey*, 1-10, 2016.
- [Pollard_1982] H. F. Pollard and E. V. Jansson. Tristimulus Method for the Specification of Musical Timbre. *Acta Acustica united with Acustica*, Vol.51 (3), 162-171(10), 1982.
- [Popper_2003] A. N. Popper, J. Fewtrell, M. E. Smith and R. D. McCauley. Anthropogenic Sound: Effects on the Behavior and Physiology of Fishes. *Marine Technology Society Journal*, Vol. 37 (4), 35-40(6), 2003.
- [Popper_2014] A. N. Popper, A. D. Hawkins, R. R. Fay, D. A. Mann, S. Bartol, et al. Sound Exposure Guidelines. *ASA S3/SC1. 4 TR-2014 Sound Exposure Guidelines for Fishes and Sea Turtles: A Technical Report prepared by ANSI-Accredited Standards Committee S3/SC1 and registered with ANSI*, 33-51, 2014.
- [Porter_1987] M. B. Porter and H. P. Bucker. Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic fields. *J. Acoust Soc. Am.*, Vol. 82 (4), 1349-1359, 1987.
- [Porter_2001] M. B. Porter. *The KRAKEN normal mode program*. SACLANT Undersea Research Centre, 2001.
- [Pourmohammad_2013] A. Pourmohammad. High speed sound source detection based on ADFSD measurement. *Information Communications and Signal Processing (ICICS) 2013 9th International Conference on*, 1-4, 2013.
- [Pradhan_2015] C. Pradhan and A. Gupta. Modeling of ambient and ship noise in underwater ocean environment of the Bay of Bengal. *Signal Processing*

- Informatics Communication and Energy Systems (SPICES) 2015 IEEE International Conference on*, 1-5, 2015.
- [Pradhan_2017] C. Pradhan and A. Gupta. Ship detection using Neyman-Pearson criterion in marine environment. *Ocean Engineering*, Vol. 143, 106-112, 2017.
- [Prescott_1997] B. Prescott and G.F. McLean. Line-based correction of radial lens distortion. *GMIP*, no. 59, pp. 39-47, 1997.
- [Qi_2006] H. Qi, X. Tao and L. H. Tao. Vehicle classification in wireless sensor networks based on rough neural network. *ACST'06: Proceedings of the 2nd IASTED international conference on Advances in computer science and technology*, 2006.
- [Quach_1999] A. Quach and K. Lo. Automatic target detection using a ground-based passive acoustic sensor. *IEEE published in Information, Decision and Control, IDC 99, Proceedings*, 187 – 192, 1999.
- [Rabiner_1989] L. B. Rabiner. A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition. *Proc. of the IEEE*, Vol. 77(2), 257–286, 1989.
- [Rennie_2010] C. D. Rennie and M. Church : Mapping spatial distributions and uncertainty of water and sediment flux in a large gravel bed river reach using an acoustic Doppler current profiler. *Journal of geophysical research*, Vol. 115, 2010.
- [Reynolds_2015] Reynolds D. *Gaussian Mixture Models*. In: Li S.Z., Jain A.K. (eds) *Encyclopedia of Biometrics*. Springer, Boston, MA. 2015
- [Rittscher_2000] J. Rittscher, J.Katon, S. Joga and A. Blake. A probabilistic background model for tracking. *In Proc. 6th European Conf. on Computer Vision (ECCV 2000)*, Vol. 2, 336–350, 2000.
- [Roberts_2001] W. J. Roberts, H. W. Sabrin and Y. Ephraim. Ground vehicle classification using hidden markov models. *Atlantic coast technologies*, 2001.
- [Robinson_2015] J. Robinson. *If oceans were a country....* Technical Advisor for Sustainable Development, UNDP Asia Pacific, 2015.
- [Roger_2010] M. Roger et S. Moreau. Extensions and limitations of analytical airfoil broadband noise models. *International Journal of Aeroacoustics*, vol. 9, (3), 273–306, 2010.
- [Ross_1976] D. Ross. *Mechanics of Underwater Noise*. NewYork Pergamon Press, 202-287, 1976.
- [Roy_2010] N. Roy, Y. Simard and C. Gervaise. 3D tracking of foraging belugas from their clicks: Experiment from a coastal hydrophone array. *Applied Acoustics*, Vol. 71 (11), 1050-1056, 2010.
- [Sahran_2018] S. Sahran, D. Albashish, A. Abdullah, N. AbdShukor and S.H. Md Pauzi. Absolute cosine-based SVM-RFE feature selection method for prostate

- histopathological grading. *Artificial Intelligence in Medicine*, Vol. 87, 78-90, 2018.
- [Sánchez-Gendriz_2016] I.Sánchez-Gendriz and L.R.Padovese. Underwater soundscape of marine protected areas in the south Brazilian coast. *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 105 (1), 65-72, 2016.
- [Santos-Domínguez_2016] D. Santos-Domínguez, S. Torres-Guijarro, A. Cardenal-López and A. Pena-Gimenez. ShipsEar: An underwater vessel noise database. *Applied Acoustics*, Vol. 113, p 64-69, 2016.
- [Saporta_2006] Saporta, G. *Probabilités, analyse des données et statistique*. Editions Technip. 2006.
- [Sara_2007] G. Sarà, J. M. Dean, D. D'Amato, G. Buscaino, A. Oliveri, S. Genovese, S. Ferro, G. Buffa, M. Lo Martire and S. Mazzola. Effect of boat noise on the behaviour of bluefin tuna *Thunnus thynnus* in the Mediterranean Sea. *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 331, 243-253, 2007.
- [Sarmiento_1998] J. L. Sarmiento, T. M. C. Hughes, R. J. Stouffer and S. Manabe. Simulated reponse of the ocean carbon cycle to anthropogenic climate warming. *Nature*, Vol. 393 (6682), 245-249, 1998.
- [Saunders_1996] J. Saunders, "Real time discrimination of broadcast speech/music," in Proc. Int. Conf. Acoustics, Speech, Signal Processing (ICASSP), 1996, pp. 993–996.
- [Starzacher_2009] A. Starzacher and B. Rinner. Single Sensor Acoustic Feature Extraction for Embedded Realtime Vehicle Classification. *2009 International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies IEEE*.
- [Scaringella_2006] N. Scaringella, G. Zoia and D. Mlynek. Automatic genre classification of music content: a survey. *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 23 (2), 133-141, 2006.
- [Scheirer_1997] E. Scheirer and M. Slaney. Construction and evaluation of a robust multifeature speech/music discriminator. *Proc. Int. Conf. Acoustics, Speech, Signal Processing (ICASSP)* pp. 1331–1334, 1997.
- [Scheirer_1998] : E. Scheirer. Tempo and beat analysis of acoustic musical signals. *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 103, no. 1, p. 588, 601, Jan. 1998.
- [Schmalfeldt_1980] B. Schmalfeldt and D. Rauch. Ambient and Ship-Induced Low-Frequency Noise in Shallow Water. *Bottom-Interacting Ocean Acoustics* Vol. 5, 329-343, 1980.
- [Schmitz_2002] B. Schmitz. Sound production in Crustacea with special reference to the Alpheidae. *The crustacean nervous system*, 536-547, 2002.
- [Schölkopf_1998] B. Schölkopf, A.J. Smola and K.-R. Müller. Nonlinear component analysis as a kernel eigenvalue problem, *Neural Computation* Vol. 10 (5), 1299–1319, 1998.

- [Schwarz_1978] G. E. Schwarz. Estimating the dimension of a model. *Annals of Statistics*, Vol. 6 (2), 461-464, 1978.
- [Schwarz_1984] Schwarz, Abby L., and Galen L. Greer. "Responses of Pacific herring, *Clupea harengus pallasi*, to some underwater sounds." *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 41.8 (1984): 1183-1192.
- [Scrimger_1991] P. Scrimger and R. M. Heitmeyer. Acoustic source-level measurements for a variety of merchant ships. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 89, 691-699, 1991.
- [Seppänen_2001] J. Seppänen, "Quantum grid analysis of musical signals," in Proc. Int. Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics (WASPAA) Mohonk, NY, 2001, pp. 131–135
- [Servajean_1994] M. Servajean and B. De Raigniac. Analyse des interférences acoustiques. *Journal de physique IV*, Colloque C5, supplément au Journal de Physique III, Vol. 4, 1994.
- [Sierra_2015] E. Sierra and J. Contreras. Classification of small boats using fuzzy classifier. *Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS) held jointly with 2015 5th World Conference on Soft Computing (WConSC), 2015 Annual Conference of the North American*, IEEE, 2015.
- [Simard_2008] Y. Simard, N. Roy and C. Gervaise. Passive acoustic detection and localization of whales: Effects of shipping noise in Saguenay–St. Lawrence Marine Park. *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 123, 4109-4117, 2008.
- [Simard_2014] Y. Simard, N. Roy, S. Giard, and M. Yayla. Canadian year-round shipping traffic atlas for 2013: Volume 1, East Coast marine waters. *Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci*, 3091, 2014.
- [Simard_2016a] Y. Simard, N. Roy, C. Gervaise and S. Giard. Analysis and modeling of 255 source levels of merchant ships from an acoustic observatory along St. Lawrence Seaway. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 140(3), 2002-2018, 2016.
- [Simard_2016b] Y. Simard, M. Bandet, C. Gervaise, N. Roy, and F. Aulanier, Soundscape cube: A holistic approach to explore and compare acoustic environments. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, Vol. 27, 2016.
- [Sini_2005] Sini, M. I., et al. "Bottlenose dolphins around Aberdeen harbour, north-east Scotland: a short study of habitat utilization and the potential effects of boat traffic." *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 85.6 (2005): 1547-1554.
- [Sirjacobs_2017] D. Sirjacobs, A. Aguera Garcia, C. Pelapat, M. Leduc, A. Volpon, B. Danis, Bruno ,S. Gobert, P. Lejeune. Caractérisation des habitats et communautés benthiques en baie de Calvi (Corse) : évaluation du potentiel de l'imagerie ROV. *Actes de colloque Carhambar, 2017. Cartographie des habitats*

- marins benthiques : de l'acquisition à la restitution*, Édition Ifremer-AFB. 161, 2017.
- [Slutzky_1927] E. Slutzky. The summation of random causes as the source of cyclic processes. *Econometrica*, Vol. 5, 105–146, 1927.
- [Somkiat_1997] S. Somkiat. *Neural fuzzy techniques in vehicle acoustic signal classification*. Ph.D. dissertation, chair-Vanlandingham. 1997.
- [Southall_2007] B. L. Southall, A. E. Bowles, W. T. Ellison, J. J. Finneran, R. L. Gentry et al. Marine mammal noise exposure criteria: Initial scientific recommendations. *Aquat. Mamm*, Vol. 33, 411-521, 2007.
- [Sorensen_2010] E. Sorensen, H. H. Ou, L. M. Zurk and M. Siderius. Passive acoustic sensing for detection of small vessels. *OCEANS 2010*, IEEE, 2010.
- [Staaterman_2013] E. Staaterman, A. N. Rice, D. A. Mann and C. B. Paris. Soundscapes from a Tropical Eastern Pacific reef and a Caribbean Sea reef. *Coral Reefs*, Vol. 32 (2), 553–557, 2013.
- [Starzacher_2009] A. Starzacher and B. Rinner. Single Sensor Acoustic Feature Extraction for Embedded Realtime Vehicle Classification. *2009 International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies IEEE*.
- [Stauffer_1999] C. Stauffer and W. E. L. Grimson. Adaptive background mixture models for real-time tracking. *In Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'99)*. 2246–2252, 1999.
- [Stein_1997] G.P. Stein. Lens distortion calibration using point correspondences. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Proceedings*, 602-608, 1997.
- [Stephens_1974] Stephens MA. EDF statistics for goodness of fit and some comparisons. *J Am Stat Assoc*, Vol. 69, 730–737, 1974.
- [Strenger_2001] B. Stenger, V. Ramesh, N. Paragios, F. Coetzee and J.M. Buhmann. Topology free hidden Markov models: Application to background modeling. *In Proc. 8th IEEE Int. Conf. on Computer Vision (ICCV 2001)*. Vol 1, 294-301, 2001.
- [Succi_1999] G. Succi, T. Pedersen, R. Gampertand and G. Prado. Acoustic target tracking and target identification-recent results. *Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 3713, 10–21, 1999.
- [Sueur_2008] J. Sueur, S. Pavoine, O. Hamerlynck, S. Duvail. Rapid acoustic survey for biodiversity appraisal. *PLoS One*, Vol. 3 (12), e4065, 2008.
- [Sutin_2010] A. Sutin, B. Bunin, A. Sedunov, N. Sedunov, L. Fillinger, M. Tsionskiy and M. Bruno. Stevens Passive Acoustic System for Underwater Surveillance. *IEEE Waterside Security Conference (WSS)*, 2010.
- [Sutin_2013a] A. Sutin, H. Salloum, M. DeLorme, N. Sedunov, A. Sedunov and M. Tsionskiy. Stevens Passive Acoustic system for surface and underwater

- threat detection. Technologies for Homeland Security (HST), 2013 IEEE International Conference on, IEEE, 2013.
- [Sutin_2013b] A. Sutin, H. Salloum, A. Sedunov and N. Sedunov. Acoustic detection tracking and classification of Low Flying Aircraft. *Technologies for Homeland Security (HST) 2013 IEEE International Conference on*, 141-146, 2013.
- [Tasker_2010] M. L. Tasker, M. Amundin, M. Andre, A. Hawkins, B. Lang, T. Merck, A. Scholik-Schlomer, J. Teilmann, F. Thomsen, S. Werner and M. Zakharia. *The Main Report of Task Group 11 for the Marine Strategy Framework Directive's descriptor No. 11. Draft 11 January 2010*, 1–39, 2010.
- [Tenenbaum_1998] J.B. Tenenbaum. Mapping a manifold of perceptual observations. *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 10, 682–688, 1998.
- [Tonolla_2011] D. Tonolla, M. S. Lorang, K. Heutschi, C. C. Gotschalk and K. Tockner. Characterization of spatial heterogeneity in underwater soundscapes at the river segment scale. *Limnology and Oceanography*, Vol. 56 (6), 2319-2333, 2011.
- [Thomas_1972] D. Thomas and B. Wilkins. The analysis of vehicle sounds for recognition. *Pattern Recogn*, Vol. 4(4), 379–389, 1972.
- [Thorp_1967] W. H. Thorp. Analytic Description of the Low-Frequency Attenuation Coefficient. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 42 (270), 1967.
- [Tong_2013] J. Tong, Y.-H. Hu, M. Bao and W. Xie. Target tracking using acoustic signatures of light-weight aircraft propeller noise. *Signal and Information Processing (ChinaSIP) 2013 IEEE China Summit & International Conference on*, 225-229, 2013.
- [Tournadre_2014] J. Tournadre. Anthropogenic pressure on the open ocean: The growth of ship traffic revealed by altimeter data analysis. *Geophysical Research Letters*, Vol. 41 (22), 7924-7932, 2014.
- [Toyama_1999] K. Toyama, J. Krumm, B. Brummit and B. Meyer. Wallflower: Principles and practice of background maintenance. *In Proc. 7th IEEE Int. Conf. On Computer Vision (ICCV'99)*, Vol.1, 255-261, 1999.
- [Towsey_2013] M. Towsey, J. Wimmerlan and W.P. Roe. The use of acoustic indices to determine avian species richness in audio-recordings of the environment. *Ecological Informatics*. Vol. 21, 110-119, 2013.
- [Tian_2005] T. Tian and A. Hampapur, A. (2005). Robust salient motion detection with complex background for real-time video surveillance. *In Proc. IEEE Workshop on Motion and Video Computing (WMVC 2005)*, Vol. 2 , 30–35, 2005.

- [Tucker_2005] S. Tucker and G.J. Brown. Classification of transient sonar sounds using perceptually motivated features. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 30, (3), 588 – 600, 2005.
- [Tzanetakis_2002] G. Tzanetakis and P. Cook. Musical genre classification of audio signals. *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, Vol. 10 (5), 293-302, 2002.
- [Urick_1983] R.I. Urick. *Principles of underwater acoustics*. McGraw-Hill, New York, 1983
- [Vapnik_1979] V. Vapnik. *Estimation of Dependences Based on Empirical Data*, 1979.
- [Verbeke_2007] N. Verbeke. *Suivi d'objets en mouvement dans une séquence vidéo*. Ph-D thesis, Université Paris Descartes, 2007.
- [Wagstaff_1973] R. A. Wagstaff. *RANDI : Research Ambient Noise Directionality model*. Rapport technique, Naval Undersea Center, 1973.
- [Wahlberg_2011] M. Wahlberg, F. H. Jensen, N. Aguilar Soto, K. Beedholm, L. Bejder, C. Oliveira, M. Rasmussen, M. Simon, A. Villadsgaard, and P. T. Madsen. Source parameters of echolocation clicks from wild bottlenose dolphins (*Tursiops aduncus* and *Tursiops truncatus*). *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 130, 2263-2274, 2011.
- [Wales_2002] S. C. Wales and R. M. Heitmeyer. An ensemble source spectra model for merchant ships. *Journal of the Acoustical Society of America*, 111:1211–1231, 2002
- [Wang_2014] S. Wang and X. Zeng. Robust underwater noise targets classification using auditory inspired time-frequency analysis. *Appl. Acoust.*, Vol. 78, 68-76, 2014.
- [Wang_2015] W. Wang and Y. Liu. The Research of Location of Moving Objects on the Lake. *IEEE Network and Information Systems for Computers (ICNISC)*, 367 - 369 ,2015.
- [Weissenbacher_2007] D. Weissenbacher and A. Nazarenko. Identifier les pronoms anaphoriques et trouver leurs antécédents : l'intérêt de la classification bayésienne. *Traitement Automatique des Langues Naturelles (TALN'07)*, Jun 2007, France. ATALA, pp.145-155, 2007.
- [Wenz_1962] G. M. Wenz. Acoustic Ambient Noise in the Ocean: Spectra and Sources. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 34 (12), 1936-1956, 1962.
- [Williams_2015] D. P. Williams. Fast Unsupervised Seafloor Characterization in Sonar Imagery Using Lacunarity. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 53 (11), 2015.
- [Wittekind_2014] D. K. Wittekind. A simple model for the underwater noise source level of ships. *Journal of Ship Production and Design*, 30(1), 1–8, 2014.

- [Wolde_1975] T.T. Wolde, J.W.Verheij and H.F.Steenhoek. Reciprocity method for the measurement of mechano-acoustical transfer functions. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 42 (1), 49-55, 1975.
- [Worm_2006] B. Worm, E. B. Barbier, N. Beaumont, J. E. Duffy, C. Folke, B. S. Halpern, J. BC Jackson, H. k. Lotze, F. Micheli, S. R. Palumbi. Impacts of biodiversity loss on ocean ecosystem services. *Sciences*, Vol.314 (5800), 787-790, 2006.
- [Wright_1983] E. B. Wright and J. Cybulski. Low-frequency acoustic source levels of large merchant ships. NRL Report 8677, Naval Research Laboratory, 1983.
- [Wu_1999] H. Wu, M. Siegel, P. Khosla. Vehicle sound signature recognition by frequency vector principal component analysis. *IEEE Trans Instrum Meas*, Vol. 48(5), 1005–1009, 1999.
- [Wysockia_2009] L.E. Wysockia, A. Codarin, F. Ladich and M. Picciulin .Sound pressure and particle acceleration audiograms in three marine fish species from the Adriatic Sea. *The Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 126 (4), 2100-2107, 2009.
- [Xia_2006] F. Xia, W. Zhang, and J. Wang. An Effective Tree-Based Algorithm for Ordinal Regression. *IEEE Intelligent Informatics Bulletin*, Vol. 7 (1), 22-26, 2006.
- [Xiang_1999] G. Xiang, L. Jirens and C. Xiangdong IANG. Fractional Brownian motion model of ship radiated noise. *Acta Acoustica*, Vol. 24, 19-28, 1999.
- [Yan_2017] J. Yan, H. Sun, E. Cheng, X. Kuai and X. Zhang. Ship Radiated Noise Recognition Using Resonance-Based Sparse Signal Decomposition. *Shock and Vibration*, Vol. 2017, 2017.
- [Yang_2000] S. Yang, Z. Li and X. Wang. Vessel radiated noise recognition with fractal features. *Electronics Letters*, IEEE, Vol. 36 (10), 923–924, 2000.
- [Yang_2002] S. Yang, Z. Li and X. Wang. Ship recognition via its radiated sound: the fractal based approaches. *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 112 (1), 172–177, 2002.
- [Yang_2013] S Yang and Z. Li. Classification of ship-radiated signals via chaotic features. *Electron. Lett.*, Vol. 39 (4), 395-397, 2003.
- [Yang_2014] K. Yang, P. Xiao, X. Li. The depth dependence and vertical directivity of shipping noise in deep ocean trenches. *OCEANS 2014 – TAIPEI*, IEEE, 2014
- [Ying_2006] X. Ying and H. Zha. Using Sphere Images for Calibrating Fisheye Cameras under the Unified Imaging Model of the Central Catadioptric and Fisheye Cameras. *Pattern Recognition, 2006. ICPR 2006. 18th International Conference on*, Vol. 4, 2006.
- [Yule_1927] U.Yule. On a method of investigating periodicities in disturbed series, with special reference to wolfer's sunspot numbers. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 226, 1927.

- [Zadeh_1983] L.A. Zadeh. A computational approach to fuzzy quantifiers in natural languages. *Computers & Mathematics with applications*, Vol. 9 (1), 1983, 149-184, 1983.
- [Zaugg_2010] S. Zaugg, M. van der Schaar, L. Houégnigan, C.Gervaise, M. André. Real-time acoustic classification of sperm whale clicks and shipping impulses from deep-sea observatories. Vol. 71 (11), 1011-1019, 2010.
- [Zeng_2013] X. Y.Zeng and S. G. Wang. Bark-wavelet Analysis and Hilbert–Huang Transform for Underwater Target Recognition. *Defence Technology*, Vol. 9 (2), 115-120, 2013.
- [Zwicker_1990] E. Zwicker and W. Peisl. Cochlear preprocessing in analog models, in digital models and in human inner ear. *Hearing Research*, Vol. 44 (2–3) Pages 209-216, 1990.

Production acoustique d'une flottille côtière : Application au suivi environnemental et à l'identification automatisée de sources sonores anthropiques.

Résumé – Le trafic maritime est le principal contributeur des bruits sous-marins anthropique : depuis les années 1970, l'augmentation du trafic maritime hauturier a provoqué dans certaines zones une augmentation du bruit ambiant de plus de 10 dB. En réponse à cette préoccupation, la Directive Cadre pour la Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM) recommande un suivi acoustique. Peu d'études s'intéressent à l'activité côtière et aux bruits rayonnés par les petites embarcations ainsi qu'à leurs conséquences sur la faune marine alors que ces environnements côtiers sont les pourvoyeurs de 41.7 % des services écosystémiques produits par les océans.

A mi-chemin entre le monde académique et le monde industriel, le travail présenté aux différents questions scientifiques et industrielles sur la thématique du trafic côtier, en termes de l'étude de son influence dans le paysage acoustique et de capacité à détecter et classifier les embarcations côtières.

En l'absence d'information sur le trafic maritime côtier, un protocole d'identification visuelle par traitement d'images GoPro® produisant les mêmes données que l'AIS (position, vitesse, taille et type d'embarcation) est proposé et permet la création de carte du trafic maritime sur un disque de 1.6km de rayon. D'un point de vue acoustique, le trafic est caractérisé par deux descripteurs acoustiques, le SPL lié à la distance du bateau le plus proche et l'ANL caractérisant le nombre de bateaux dans un disque de 500 m de rayon. Le suivi spatio-temporel de ces descripteurs permet d'identifier l'impact du trafic maritime dans le paysage acoustique des environnements côtiers. La détection et la classification sont réalisées après caractérisation individuelle du bruit par un ensemble de paramètres acoustiques et par l'utilisation d'algorithmes d'apprentissage supervisé. Un protocole spécifique pour la création de l'arborescence de classification est proposé par comparaison des données acoustiques aux caractéristiques physiques et contextuelle de chaque bateau.

Les travaux présentés sont illustrés sur la flottille d'embarcations côtières présente dans la baie de Calvi (Corse) durant la saison estivale.

Mots clés : monitoring acoustique passif, flottille d'embarcation côtière, carte du trafic maritime, localisation par traitement d'images, descripteurs acoustiques, paysage acoustique, détection, classification, apprentissage supervisé.

Abstract – Marine traffic is the main contributor to anthropogenic underwater noise: since the 1970s, the increase in deep-sea shipping has increased the ambient noise by more than 10 dB in some areas. In response to this concern, the Marine Strategy Framework Directive (DCSMM) recommends acoustic monitoring. Few studies are concerned with coastal activity and the noises radiated by small craft while these coastal environments are the purveyors of 41.7% of the ecosystem services produced by the oceans.

Between the academic and the industrial world, this PhD was to answer the different scientific and industrial questions on the topic of the coastal traffic in terms of the influence in the soundscape and the detection and classification of the coastal craft.

Without information on the coastal maritime traffic, a visual identification protocol is proposed using GoPro® images processing and produced the same data as the AIS (position, speed, size and type of craft); It allows to create maritime traffic maps on a disk of 1.6km radius. The traffic is characterized by two acoustic descriptors: the SPL linked to the distance of the nearest boat and the ANL linked to the number of boats present in a 500 m radius disc. The spatiotemporal monitoring of these descriptors allows to identify the impact on the maritime traffic on the coastal acoustic landscape. The acoustic detection and the classification are performed after individual characterization of the noise by a set of acoustic parameters and using of supervised machine learning algorithm. A specific protocol for the creation of the classification tree is proposed by comparing the acoustic data with the physical and contextual characteristics of each boat.

The methods are applied on the flotilla of coastal boats present in the Bay of Calvi (Corsica) during summer.

Keywords : passive acoustic monitoring, coastal vessel fleet, maritime traffic map, image processing location, acoustic descriptors, acoustic soundscape, detection, classification, machine Learning.
