

UNIVERSITÉ DU SUD TOULON VAR
LABORATOIRE SCIENCES DE L'INFORMATION ET DES SYSTÈMES
UMR CNRS 7296
EQUIPE DYNAMIQUES DE L'INFORMATION

Rapport du projet DECAV
06 mai 2011 au 15 novembre 2012

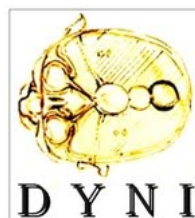
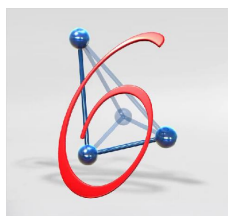
" DETECTION et CLASSIFICATION
sur TRANSECT AUDIO-VISUEL de
POPULATIONS
de CETACES du NORD PELAGOS -
ILES d'OR " [DECAV]

PELAGOS - PNPC - DYNI USTV



n° 11-031 83400 PC

Régis Abeille, Faicel Chamroukhi, Yann Doh, Olivier Dufour,
Pascale Giraudet, Xanadu Halkias, Hervé Glotin, Jean-Marc
Prévot, Céline Rabouy, Joseph Razik
contact : glotin@univ-tln.fr



Remerciements

Nous remercions les acteurs du Parc National de Port-Cros, notamment Thierry Houard et son équipe pour son aimable collaboration lors des sorties en mer, ainsi que toute l'équipe scientifique pilotée par Alain Barcelo pour sa confiance, et le directeur du PNPC M. Sellier pour son soutien constant, et enfin Marion Peirache pour sa conduite en fin de projet.

Nous remercions également Pelagos pour le financement du programme DECAV, ainsi que l'association Regard du Vivant pour certaines sorties en mer qui ont permis d'ajouter quelques observations acoustiques.

Nous remercions le Président de l'Université du Sud-Toulon Var, Pr. Marc Sallard ainsi que les Vice-Présidents et membres des conseils de l'USTV pour leur intérêt sur nos travaux en reconnaissance multimodale de forme appliqués à la surveillance de l'environnement, notamment via le financement de la thèse de R. Abeille.

Nous remercions également l'Institut Universitaire de France qui soutient ce programme, ainsi que la Mission Interdisciplinaire du CNRS Masses de Données Scientifiques MASTODONS qui soutient notre projet Scaled Acoustic Biodiversity.

Nous sommes également reconnaissants envers Pr. Gianni Pavan du Cibra, univ. Pavia Italie, et Olivier Adam, univ. Paris 6 pour leurs conseils continus.

Résumé

Ce bilan du programme DECAV présente une première génération de méthodes automatiques permettant de détecter et d'identifier, soit par acoustique soit par photographie, dauphins et cachalots du Nord Ouest Pelagos. Certaines d'entre elles fonctionnent sans aucune supervision, et sont prêtes à être installées pour une surveillance en continu. Les résultats forts de ce programme sont (1) une mise en évidence d'une observation efficace des cachalots par acoustique passive (quatre fois plus de détections que par observation visuelle), (2) pour la première fois, une méthode d'estimation in situ la taille des cachalots enregistrés, et donc leur identification, (3) une mise en évidence in situ claire et automatique des motifs de sifflements de dauphins, (4) une stratégie de mesure de similarité des ailerons de dauphins pour l'aide à la photoidentification.

Mots-Clefs : Surveillance automatique écosystème, Cachalot, Dauphin, Rorqual, Reconnaissance de forme, Traitement signal, Bioacoustique, Biosonar, Vocalise, Intervalle Inter Pulse, Estimation automatique taille cachalot, Acoustique sous-marine, Perturbation anthropique, Pétardage, Propagation acoustique, Suivi temps-fréquence, Analyse d'image, Données fonctionnelles, Photo-identification, Suivi de population.

Table des matières

1	Introduction générale	5
2	Détection acoustique stationnaire de cétacés : applications aux dauphins	8
2.1	Objectifs : Bruit versus Signal	8
2.1.1	Signaux ciblés	8
2.1.2	Difficultés, bruits de nature anthropique	10
2.2	Equations Sonar Passif	15
2.2.1	Niveau de source apparent	16
2.2.2	Propagation du son	18
2.2.3	Niveau de bruit	18
2.2.4	Seuil de détection	20
2.2.5	Gain de l'hydrophone	21
2.2.6	Gain du système de traitement	21
2.3	Différentes valeurs de seuil pour éliminer les bruits continus non biologiques	21
2.4	Algorithme du détecteur spectral	28
2.4.1	Schéma Algorithmique	28
2.4.2	Script, illustrations et commentaires	29
2.5	Courbe COR (Caractéristiques Opérationnelles de Réception)	33
2.5.1	Efficacité du détecteur	33
2.5.2	Valeur optimale de seuil	35
2.6	Résultats	37
2.6.1	Distribution temporelle de l'abondance en dauphins	37
2.6.2	Signatures inter et intra spécifiques de dauphins	38
2.7	Conclusions et perspectives	49
3	Identification acoustique de cétacés : applications aux cachalots	51
3.1	Introduction	51
3.2	Estimation des tailles	52
3.3	Résultats	55
3.3.1	Détections et Tailles	55
3.3.2	Distribution géographique des détections de cachalots	59
3.4	Discussion, recommandations	62

4	Analyse de perturbation acoustiques anthropiques : application aux pétardages	65
4.1	Généralités sur les pétardages	65
4.2	Matériel et méthode	66
4.3	Analyse des mesures acoustiques	66
4.3.1	Representation temps - fréquence	66
4.3.2	Dans le domaine temporel	67
4.3.3	Dans le domaine fréquentiel	68
4.3.4	Quantification relative du niveau sonore engendré par l'explosion	71
4.4	Discussion et perspectives	73
4.4.1	Impact du son sur les cétacés	75
4.4.2	Références théoriques	78
4.4.3	Proposition d'aide aux mesures de gestion des risques dus aux pétardages	81
5	Détection visuelle de cétacés : applications aux ailerons de dauphins	83
5.1	Introduction	83
5.2	Segmentation d'image	84
5.2.1	Algorithme du clustering k-means	84
5.2.2	Méthode d'ondelettes	84
5.2.3	Méthode de Filtrage adapté stochastique (FAS)	85
5.3	Méthodes d'approximation de fonctions	87
5.3.1	Introduction	87
5.3.2	Régression polynomiale	87
5.3.3	Splines de régression	88
5.3.4	Estimation des paramètres	89
5.4	Résultats de la segmentation d'image d'aileron de dauphins	90
5.4.1	Segmentation d'image	90
5.4.2	Détection des contours	93
5.5	Résultats de l'approximation des fonctions de contour de l'aileron	94
5.5.1	Régression polynomiale	94
5.5.2	Régression par splines	98
5.5.3	Régression par B-splines	98
5.6	Conclusion	99
5.7	Annexe	101
5.7.1	Analyse multirésolution	101
5.7.2	Algorithme de l'analyse multirésolution - Algorithme de Mallat	103
5.7.3	Splines de régression	105
6	Identification visuelle de cétacés : perspectives sur la photo-identification automatique	108
6.1	Méthodes de similarité appliquées à des jeux de données	108
6.1.1	Alignement Dynamique	108
6.1.2	Similarité appliquée à l'espace des paramètres	110
6.2	Résultats de la mesure de similarité appliquée aux profils et à leurs approximations	111
6.2.1	Méthode de l'alignement dynamique	111

6.2.2	Comparaison des méthodes de l'alignement dynamique et des similitudes des paramètres : matrices de confusion . . .	113
6.3	Conclusion	116
6.4	Annexe	117
6.4.1	Images utilisées pour réaliser l'identification visuelle . . .	117
7	Conclusion générale	124
7.1	Vers un suivi 3D sous-marin temps-réel des cétacés	125

Chapitre 1

Introduction générale

Ce programme de recherche a vocation d'apporter des éléments de traitements aux gestionnaires afin d'atteindre les objectifs de certaines thématiques prioritaires du plan de gestion du Sanctuaire PELAGOS :

- Identification acoustique, photo-identification, dénombrement, répartition et migrations saisonnières des cétacés en méditerranée nord-occidentale.
- Bibliographie sur les effets des pétardages.
- Proposition de méthode pour l'établissement d'un catalogue photo-identité unifié pour le bassin nord-occidental.

Ce rapport contient le bilan de ces recherches menées dans l'équipe DYNI de l'USTV durant la période du projet (Mai 2011 - Septembre 2012) : le traitement / détection automatique et l'identification, déclinés sur deux modalités : l'acoustique et l'image. Ce bilan a permis de créer une base de données acoustique se trouvant sur <http://sabiiod.org>. On peut y entendre certains des fichiers qui sont traités en suivi de piste. Il est composé de 5 chapitres :

Le premier chapitre présente les fonctions de détection automatique par acoustique passive de plusieurs espèces de cétacés, avec du matériel mono-hydrophone simple, peu encombrant et robuste, embarqué sur le bateau du PNPC. Le matériel acoustique utilisé dans ces recherches a été mis au point notamment au travers de la collaboration avec J.M. Prévot [28]. Cette fonction est donc amont non seulement à la fonction d'identification acoustique, mais aussi d'identification visuelle. Nous donnons les exemples d'applications sur les dauphins et une qualification des formes de leurs sifflements mesurées durant le projet.

Le suivant présente les fonctions algorithmiques d'identification par acoustique passive de cachalots : une estimation de la taille des individus enregistrés. L'intégration des mesures sur le transect en permet une étude de type biopopulation. Le cas est illustré par les mesures menées par l'équipe durant le projet et donne pour la première fois une statistique des tailles des individus croisant le secteur.

Les mesures sont effectuées à bord de navires par l'équipe DYNI conjointe-

ment avec le Parc National de Port-Cros. Les sorties sont réalisées en tenant compte du profil bathymétrique de la zone. Un dispositif d'acquisition mobile (fréquence d'échantillonnage de 48 khz sur 16 bits) a été développé autour d'un hydrophone C55, 30 à 50 m de câble et d'un ordinateur portable.

Il est possible de déployer le système lors d'arrêts réguliers ou en cours de navigation. Un GPS, connecté au système d'acquisition associe automatiquement la position du point de mesure à l'enregistrement. La stabilité et le maintien de la position de l'hydrophone sont assurés par un lestage adapté. Il faut noter que les mesures en situation de navigation sont sujettes à un parasitage par le bruit des moteurs et les effets de traînée du bateau. Ainsi les mesures précises sont faites à l'arrêt.

Les hydrophones C55 sont large bande et présentent une sensibilité linéaire entre 0 et 44 khz, ce qui est satisfaisant pour nous au regard du taux d'échantillonnage utilisé. En terme de directivité ces hydrophones sont considérés comme omnidirectionnels jusqu'à 10 khz. Au-delà, ils deviennent très directionnels : à 200 khz, la largeur à -3 dB du lobe principal est un angle solide de 15° .



FIGURE 1.1 – Hydrophone Cetacean Research C55

Nous donnons alors l'état bibliographique et des suggestions quand aux effets des pétardages dans le même secteur.

Enfin pour le traitement visuel, nous donnons les traitements d'image spécifique à la détection de cétacés sur clichés photographiques de qualité non normalisée. Cette fonction permet l'exploitation de photographies prises depuis le bateau (PNPC ou autre) ou aériennes. Elles assurent une normalisation des données visuelles pour l'usage des fonctions photo identification décrites ci-dessous.

Nous concluons sur les fonctions algorithmiques de l'état de l'art en classification automatique que développe DYNI, ayant pour objectif l'ordonnement de photos d'aïlerons prises sur le terrain et comparées aux références cataloguées, ce qui allègera significativement l'identification usuellement manuelle en concentrant l'effort de l'expert sur les N identités les plus probables. L'ensemble du traitement à vocation à être complètement automatique, ce qui est un avantage par rapport au logiciel Darwin ou autre système photo-id dédié à la cétologie. Ce système est en train d'être mis en ligne sur le site DYNI de l'USTV pour assurer des requêtes d'identification directes adressées par le PNPC ou tout autre utilisateur.

Ces fonctions DECAV pourront être optimisées pour les conditions acoustiques du milieu sous marin des îles d'or suivant le trajet du transect, et suivant les quatre espèces visées qui fréquentent la région des îles d'Hyères, dans le but de les cataloguer, en déduire une carte spatio-temporelle de présence, informations à ce jour parcimonieuses.

Chapitre 2

Détection acoustique stationnaire de cétacés : applications aux dauphins

2.1 Objectifs : Bruit versus Signal

Nous présentons ici un détecteur basé sur l'analyse du spectre. Et il a pour objectif d'extraire, quantifier, dater des sifflements de dauphins.

Ce détecteur est un algorithme de binarisation et de suivi des sifflements de dauphins. Il nous a permis de créer un indice acoustique de dénombrement et d'extraire les signatures à l'échelle de l'individu (d'après les hypothèses de décroche temps-fréquence).

2.1.1 Signaux ciblés

Dans cet extrait de 10 secondes, figurent 3 différents types d'émissions sonores de dauphin *Stenella coeruleoalba* (voir figure 2.2) : Les sifflements (à 6,5 et 9 secondes), les bursts (peu avant la 6ème seconde et à 9 secondes) et les clics. Le détecteur spectral vise la détection et l'extraction automatiques de ces signaux. Ceci afin d'obtenir en amont une analyse écologique de la fréquentation des eaux du PNPC par l'espèce. Et également pour analyser plus en détails le panel de signaux produits et assemblés par cette espèce. Les sons pulsés (comme les "bursts") ont principalement été étudiés en relation avec l'écholocation (Au, 1993), mais plusieurs études ont suggéré dès 1990 que les sons pulsés sont aussi utilisés dans les contextes sociaux. Dawson (1991) a trouvé une abondance significativement plus élevée de bursts à haute répétition pendant les situations de comportement agressif que pendant les situations de nourrissage chez le Dauphin d'Hector *Cephalorhynchus hectori*. Ceci suggère que ces bursts étaient plus des sons sociaux que d'écholocation. Il a également mis en exergue qu'il est hautement improbable que les sifflements constituent la base complète de la communication intraspécifique chez les odontocètes (cétacés à dents), puisque cela impliquerait que les dauphins non siffleurs (par exemple, le Dauphin de Risso, figure 2.3, siffle rarement) ne communiquent acoustiquement pas du tout entre eux. Amundin (1991) reporta que les bursts dans les situations de détresse ou de

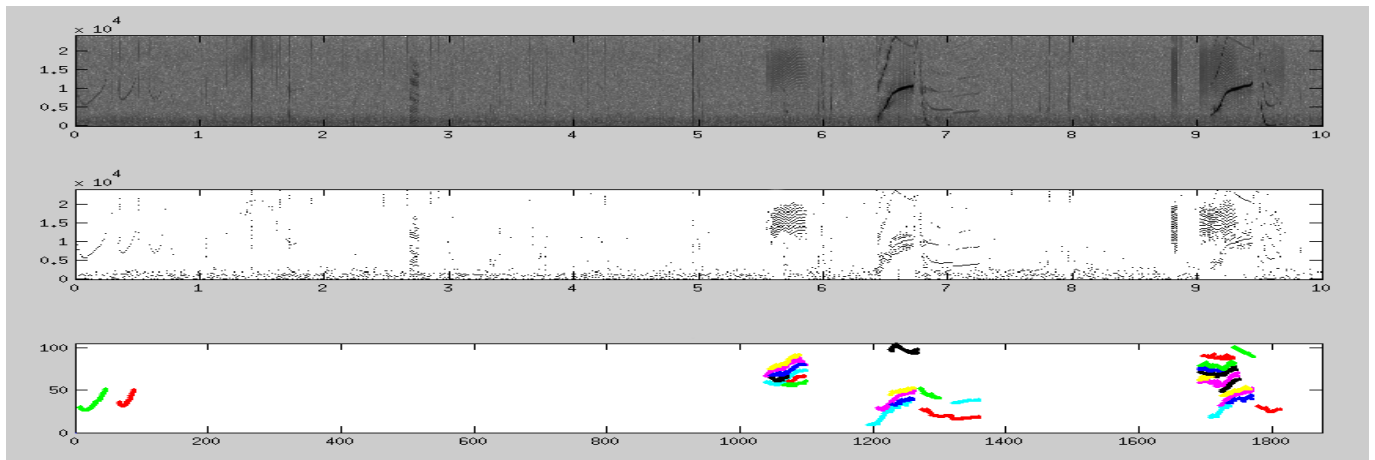


FIGURE 2.1 – Trois différents types d’émissions sonores de dauphin *Stenella coeruleoalba*. En abscisse, un intervalle de temps de 10 secondes quantifié en secondes (schéma du haut et milieu) puis en bins (schéma du bas). En ordonnées, les fréquences en Hertz de 0 à 48 000Hz (schéma du haut et milieu) puis en bins (schéma du bas).

confrontation présentent des pattern de répétition contexte-spécifiques chez le marsouin commun *Phocoena phocoena*. Connor and Smolker (1996) ont identifié un son pulsé appelé “pop” corrélé avec le rituel de reproduction et/ou avec la dominance chez le grand dauphin, *Tursiops truncatus*. Puis Overstrom (1983) indiqua que les sons pulsés étaient corrélés avec les comportements agressifs chez cette même espèce.

Comment fonctionne l’algorithme ?

- Premièrement, l’algorithme extrait du fichier sonore (format .wav) le spectrogramme de quelques secondes du signal.
- Deuxièmement, le spectrogramme est transformé en un tableau de 0 et de 1 (binarisation). Le passage de l’étape 1 à 2 ne retient que les points d’une amplitude suffisamment élevée. Concrètement, ce sont les points appartenant à des signaux sonores d’amplitudes plus élevées que le niveau moyen de l’écosystème qui sont retenus. On peut voir dans la 2ème tranche de la figure 2.1 que sont ainsi retenues les trois productions sonores des dauphins : les clics (barres verticales aux secondes 1,5, 5, 8 ...), les “sifflements” ou “voisements” (ex : secondes 6 à 7) et les “bursts” (ex : secondes 5 à 6).
- Troisièmement, sont retenus entre eux les points formant des “traces” ou “trajectoires” continues dans le spectre. Ceci permet d’exclure le bruit ambiant qui parfois est fort mais qui est constamment discontinu.

Nous avons fait le choix de construire un détecteur de dauphins qui ne s’intéresse pas aux clics. Ceci pour

- éviter les risques de confusions liés à la ressemblance avec les clics de cachalots;
- obtenir des signatures plus diverses et variées : donc plus informatives.



FIGURE 2.2 – *Stenella coeruleoalba*, le dauphin bleu et blanc (îles d’Hyères, 16/09/2011)

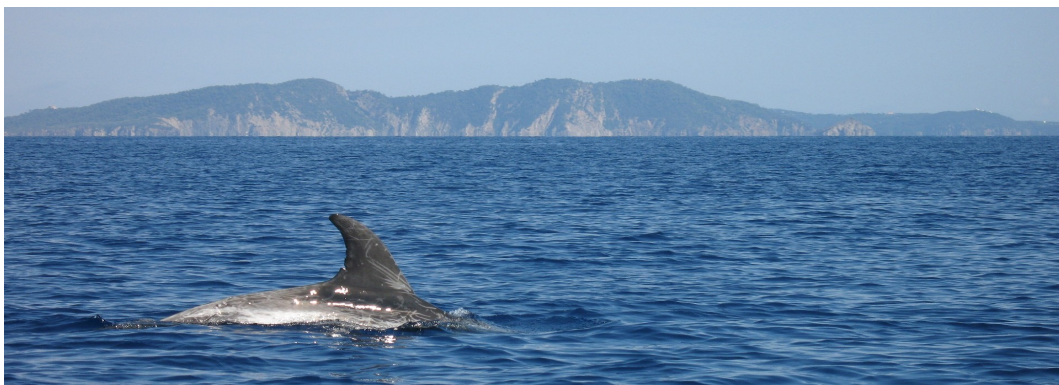


FIGURE 2.3 – *Grampus griseus*, le dauphin de Risso (îles d’Hyères, 16/09/2011).

2.1.2 Difficultés, bruits de nature anthropique

Il existe des stimuli d’origine non biologique dont la “forme” dans le spectrogramme se rapproche de celle des voisements de dauphins :

- passage d’un moteur de bateau à distance;
- démarrage du moteur du zodiac du PNPC;
- matière caoutchouteuse du zodiac du PNPC frottée (figure 2.4);
- tapotements du zodiac du PNPC sur la surface;
- vagues douces;
- trim du zodiac du PNPC;

Ces stimuli ont demandé une attention particulière. Il a été nécessaire de trouver des critères supplémentaires permettant de les différencier des signaux d’intérêt.

Voici quelques exemples de bruits généralement générés par l’opérateur, pouvant être confondus avec un sifflement de dauphin par le détecteur dans sa version inachevée :

La figure 2.5 a pour intérêt de montrer qu’un démarrage de moteur hors-bord correspond à une simultanéité de bruits continus. Le démarrage d’un moteur

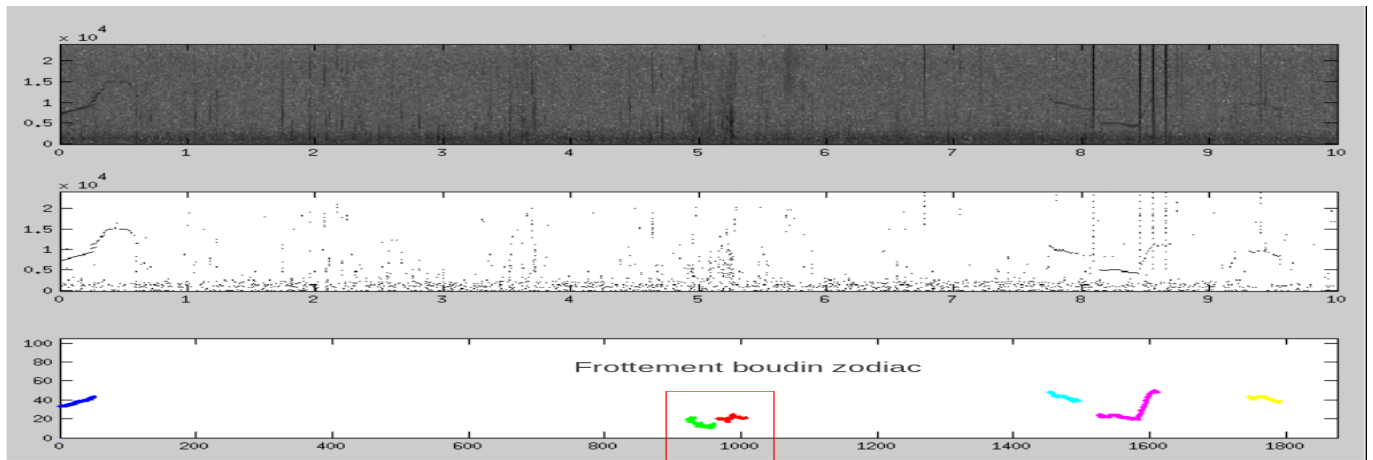


FIGURE 2.4 – Frottement de boudin de Zodiac. En abscisse, un intervalle de temps de 10 secondes quantifié en bins. En ordonnées, les fréquences en Hertz puis en bins.

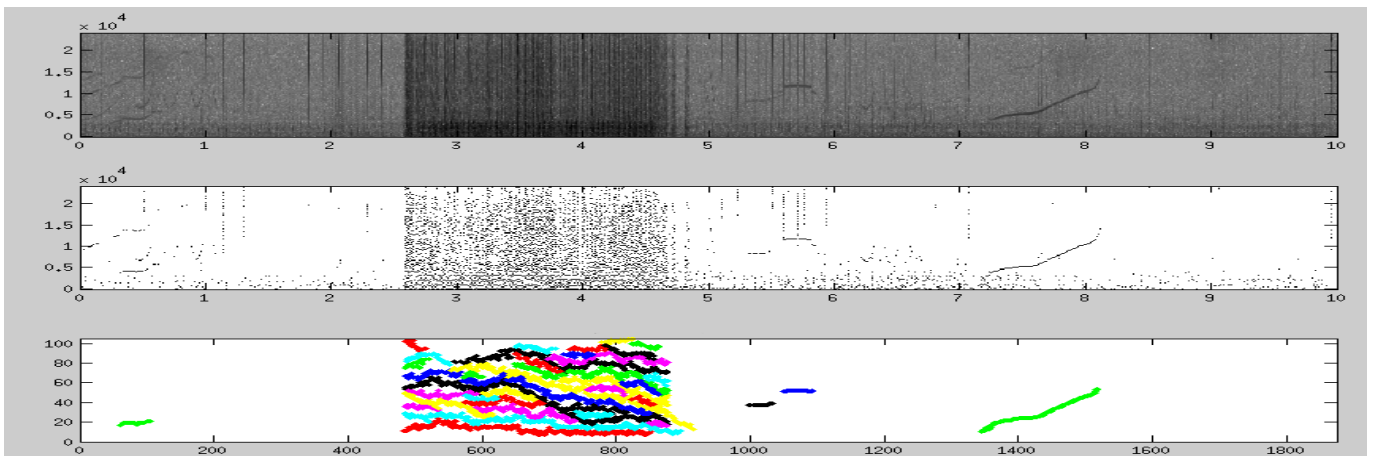


FIGURE 2.5 – Démarrage de moteur hors-bord (bateau du Parc national) à 30 mètres de l’hydrophone. En abscisse, un intervalle de temps de 10 secondes quantifié en bins. En ordonnées, les fréquences en Hertz puis en bins.

hors bord forme différents bruits continus. Pour les éliminer, le LSIS a tablé sur un critère simple et ajustable : sont exclus les bruits dont le tracé varie souvent ou trop brutalement de sens (montant/descendant). On peut constater que les sifflements avant et après le démarrage de moteur présentent eux des tracés aux pentes douces et moins variables.

Nous venons de donner des exemples montrant que le détecteur dans une version ancienne identifie comme sifflements encore trop de stimuli se révélant être en réalité des sons de nature anthropique à caractère continu : un sonar, un enregistrement de mauvaise qualité, l’allumage d’un moteur, l’activation du “trim” sur un hors bord (cf figure 2.6) ...

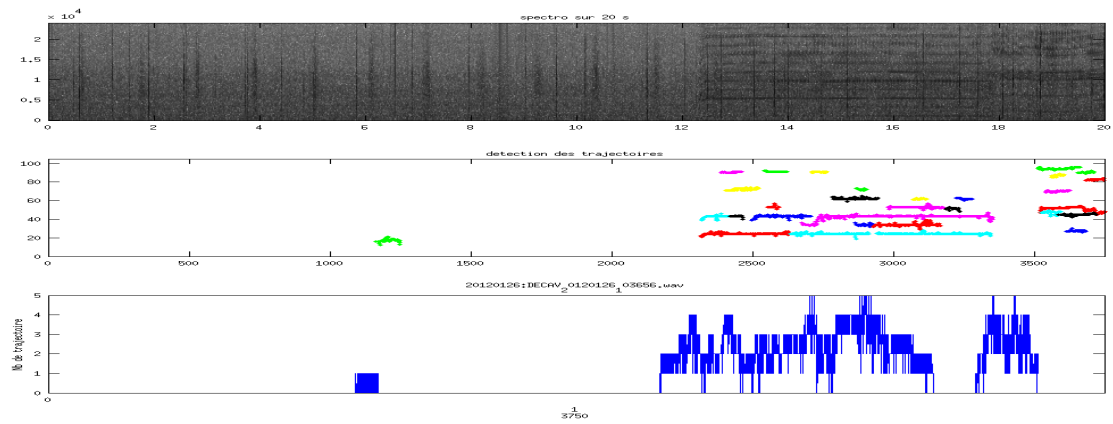


FIGURE 2.6 – Signature sonore de l’utilisation d’un “trim” : système permettant de régler l’inclinaison d’un moteur hors bord via un moteur électrique couplé à des vérins hydrauliques.

A ce stade le détecteur est dit "semi-automatique" : Il pourrait être utilisé par une opérateur XY. Lequel économiserait un temps et une précision conséquents en regardant la forme des trajectoires extraites plutôt qu’en écoutant les enregistrements. Ces résultats bruts permettent à XY de connaître la date, le nombre, la forme (donc l’espèce) et la construction des voissements de dauphins.

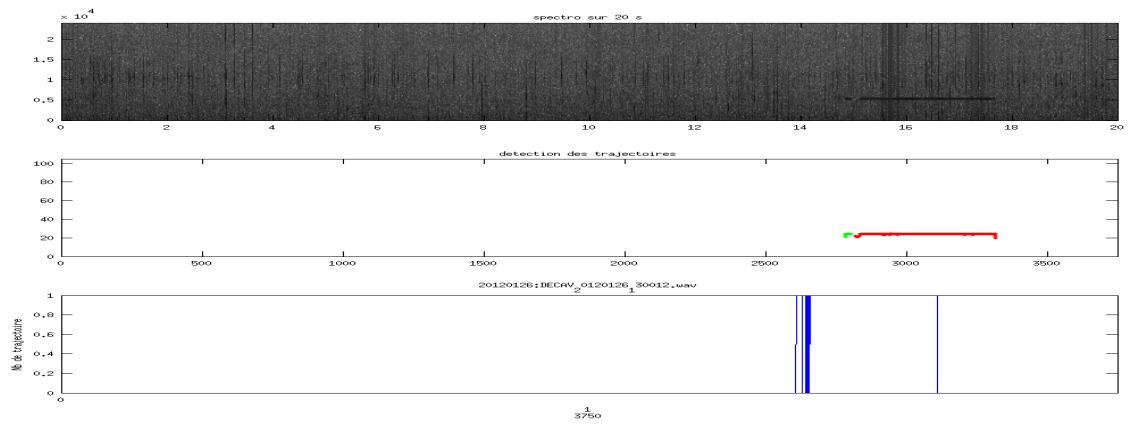


FIGURE 2.7 – Allumage de sonar militaire le 20120126 130012

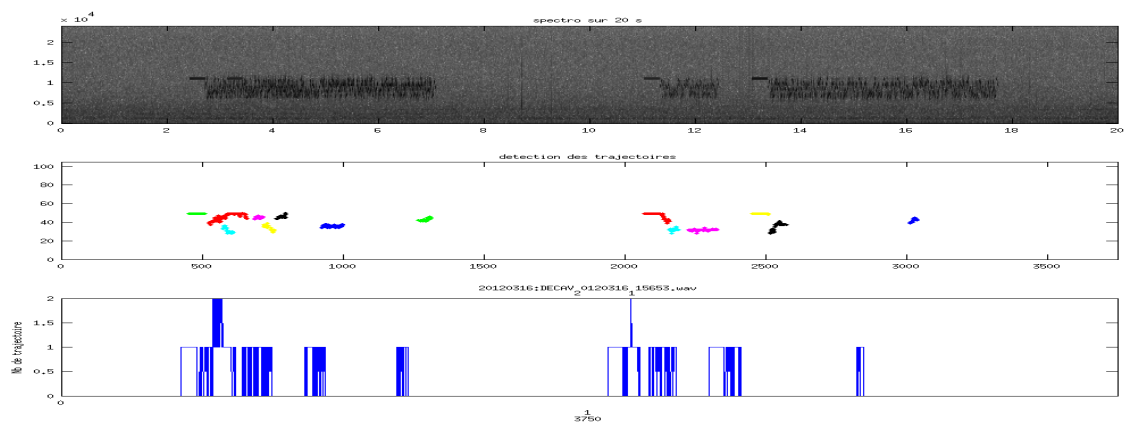


FIGURE 2.8 – Deux sonars militaires employés simultanément. Le sonar de coque d'un bâtiment militaire ainsi qu'un sonar remorqué à profondeur variable.

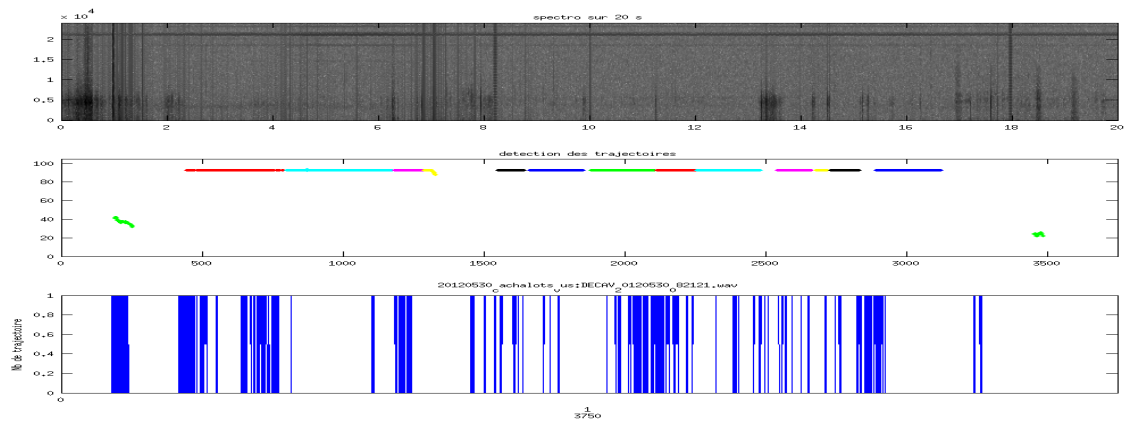


FIGURE 2.9 – Fausses détections dues à un système d’acquisition mal assemblé.

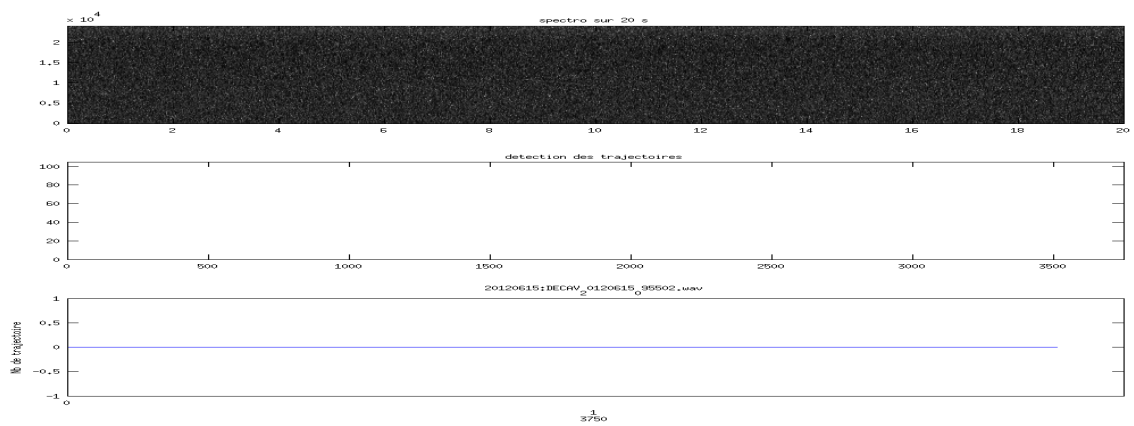


FIGURE 2.10 – Exemple d’enregistrement ne contenant ni sifflements ni signaux anthropiques susceptibles d’entraîner de fausses détections.

2.2 Equations Sonar Passif

Avant d'écrire l'algorithme de détection passive, nous rappelons les grandes variables de l'équation sonar passif et l'adaptions à la détection de sons de cétacés dans notre site d'étude [36]. Commençons par la définition de ce qui constitue la détection acoustique passive, l'introduction du ratio signal sur bruit (SNR) et du seuil de détection. Le reste du chapitre discutera des différentes composantes de l'équation sonar et de leur prise en compte dans l'algorithme du détecteur spectral ici présenté :

- Niveau de la source ;
- Atténuation off-axis ;
- Propagation du son ;
- Niveau de bruit ;
- Gain de l'hydrophone ;
- Gain du système de traitement.

Discuter de la propagation du son sera une partie majeure de ce chapitre et couvrira des modèles géométriques simplifiés. Comme le niveau du bruit est un autre élément clé de l'équation sonar passif, ses sources et niveaux seront abordés plus en détail.

Les équations sonar décrivent en termes simples les conditions en dessous desquelles les systèmes sonar réussissent à détecter à distances des signaux.

Elles ont deux importantes fonctions pratiques de prédiction de performance de systèmes sonars existants et de support à la conception de nouvelles implémentations sonar.

Les équations sonar ont différents aspects selon leur référentiel et leur usage passif ou actif. L'équation sonar passif est la forme pertinente dans notre cas de suivi acoustique passif.

Il y a un grand nombre de façons de formuler les équations sonar passif. Est commun à toutes le fait qu'elles décrivent les conditions en dessous desquelles le système sonar remplit sa tâche.

Pour détecter un signal (son de cétacé) une décision sera prise, par un observateur humain ou par un détecteur automatique (c'est notre cas) appelé "opérateur signal". Celui-ci déclare le signal présent ou non. Si aucun signal n'est présent, l'opérateur écoutera seulement ce qui est appelé le bruit de fond. Et l'opérateur sonar décidera de la présence d'un signal si il ou elle note une variation dans le bruit de fond pouvant être attribuée avec confiance à la présence du signal. Concrètement, les opérateurs sonars analysent le bruit de fond et détectent des signaux si ce qu'ils entendent diffère en amplitude, énergie ou statistique du bruit de fond.

Pour éviter les décisions subjectives, l'équation sonar de base est utilisée pour déterminer un ratio SNR minimal pour lequel les enregistrements seront soumis à la recherche de signaux positifs. Pour détecter un signal, nous relierons un SNR minimum (SNR) à un seuil fixe et bien défini (TH).

R et θ étant respectivement la distance entre l'émetteur - récepteur et l'angle avec l'on-axis.

L'on-axis est l'axe dans lequel un signal sonore (exemple : clic de cachalot) est émis. En effet, les signaux sonores de cétacés sont souvent directionnels : ils

sont concentrés dans (généralement) une direction de l'espace, laquelle pointe en avant de l'animal. En conséquence, un hydrophone placé à x mètres en face d'un cachalot enregistrera ses clics avec la même intensité qu'un hydrophone placé à $x/2$ mètres mais avec une valeur d'angle supérieure à 0 degrés.

L'angle off-axis est l'angle séparant l'axe on-axis de l'axe passant par la source sonore et l'hydrophone quand celui ci n'est pas positionné sur l'on-axis.

$$SNR_{min}(R, \theta) = TH \quad (2.1)$$

- TH : seuil fixé et clairement défini ;
- $SNR_{min}(R, \theta)$: SNR minimum en fonction de la distance à la source et de l'angle avec l'on-axis.

Si le SNR véritable dépasse le seuil, alors le système sonar indiquera la présence d'un signal. Autrement, le système décidera que le signal est absent. Le ratio SNR est typiquement exprimé en dB. Pour le suivi acoustique passif des cétacés, il peut être décrit comme suit :

$$SNR(R, \theta) = ASL(\theta) - TL(R) - NL + AG + PG \quad (2.2)$$

Le SNR en fonction de la distance à la source et de l'angle avec l'on-axis est égal à la somme du niveau de source apparent, du niveau de bruit ambiant (bruit de fond), du gain au niveau de l'hydrophone, du gain au niveau du système d'acquisition ou de traitement en aval retranché de la perte par transmission.

- $ASL(\theta)$ est le niveau sonore apparent de la source [en dB // 1micro Pascal @ 1m] en fonction de l'angle off-axis ;
- $TL(R)$ est la perte par propagation ;
- NL est le niveau de bruit de fond, ou ambiant, masquant le signal ;
- AG est le gain de l'ensemble hydrophonique receveur ;
- PG est le gain du système d'acquisition.

Le SNR , tel que défini dans l'équation 2.2, décrit le ratio SNR au moment de la décision. Pour cette raison, l'équation 2.2 inclut un terme qui décrit la perte par propagation $TL(R)$. Elle inclut également les gains potentiels dus

- à la sensibilité directionnelle des hydrophones lorsqu'ils sont multiples (ensemble receveur) AG ;
- à d'éventuels gains lors de l'acquisition PG , typiquement utilisés pour réduire les contaminations non désirées du signal (par le bruit).

2.2.1 Niveau de source apparent

C'est une inconnue typique lors de l'écoute des sons de cétacés, pouvant être scindée en deux composants : l'un décrivant le niveau de source maximum, l'autre décrivant la réduction de l'intensité sonore en fonction de l'angle off-axis.

$$ASL(\theta) = SL_0 - DL(\theta) \quad (2.3)$$

SL_0 est le niveau de la source on-axis (c'est-à-dire le niveau de source maximum). Et $DL(\theta)$ est la perte directionnelle de la source en fonction de l'angle off-axis.

Si l'on suppose que le niveau sonore est invariant à la source pour les cétacés, alors le niveau de source apparent dépend uniquement de l'angle off-axis, qui est l'angle entre l'axe acoustique (la direction vers laquelle se dirige l'essentiel de l'énergie) et la direction du récepteur. La perte directionnelle de la source sonore est donnée par le schéma de la directivité de la source (voir équation 2.4) exprimée en dB.

$$D(\theta) = \left| \frac{P(r, \theta, t)}{P(r, 0, t)} \right|^2 = \left(\frac{2J_1(k \sin \theta)}{k \sin \theta} \right)^2 \quad (2.4)$$

P est la pression acoustique. J_1 désigne une fonction premier ordre de Bessel de première espèce. Lorsque $D(\theta)$ est négatif, on parle alors d'atténuation off-axis.

Atténuation off-axis de la bande passante de pulses biosonar Gaussiens

L'atténuation off-axis est particulièrement pertinente pour l'écholocation des baleines à dents émettant des pulses biosonar comme les cachalots. Ces pulses sont en général très courts, large bande et son émis par une région de la tête de l'animal petite et quasi circulaire. Si on assimile ces pulses biosonar à des pulses gaussiens émis par un piston circulaire, en utilisant l'équation 2.4, on obtient pour les fréquences positives, un schéma de directivité fréquence-dépendant.

$$D(\omega, \theta) = \exp\left\{ \frac{-\theta^2}{\theta^2} (\omega - \omega_0)^2 \right\} \left(\frac{2J_1(k \sin \theta)}{k \sin \theta} \right)^2 \quad (2.5)$$

ω est la fréquence angulaire. On voit que pour un pulse biosonar gaussien, le schéma de directivité est pesé avec une fonction weighting à forme gaussienne. On peut exprimer le schéma de directivité spectrale comme suit :

$$D(ka, \theta) = \exp\left\{ -\left(\frac{ka - ka^2}{\beta} \right)^2 \right\} \left(\frac{2J_1(k \sin \theta)}{k \sin \theta} \right)^2 \quad (2.6)$$

Le schéma de directivité large bande est alors obtenu en intégrant le schéma de directivité spectral à toutes les fréquences; ce qui équivaut à toutes les ka valeurs.

$$D(bb, \theta) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left\{ -\left(\frac{ka - ka^2}{\beta} \right)^2 \right\} \left(\frac{2J_1(k \sin \theta)}{k \sin \theta} \right)^2 d(ka)}{\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left\{ -\left(\frac{ka - ka^2}{\beta} \right)^2 \right\} d(ka)} \quad (2.7)$$

En pratique, l'intégration peut être remplacée par une sommation de -3dB à +3DB.

$$D_{bx}(\theta) = C1 \frac{(C_2 \sin^2 \theta)}{1 + |C_2 \sin \theta| + (C_2 \sin \theta)^2} \quad (2.8)$$

$$C1 = 0.218 \quad (2.9)$$

$$C2 = 47 \quad (2.10)$$

L'atténuation off-axis joue donc un rôle majeur dans la détection de cachalots. Mais le détecteur spectral présenté ici se concentre sur les voissements de delphinidés. Les voissements sont omnidirectionnels (Evans, Sutherland et Beil, 1964). Ils véhiculent des informations à tous les membres d'un même groupe à propos de l'identité, la position relative et l'état émotionnel de l'individu émetteur (Caldwell et Caldwell 1972) [5]. L'atténuation off-axis tombe alors à 0 et peut être exclue de l'équation.

2.2.2 Propagation du son

Quand le son se propage au travers de n'importe quel milieu, son intensité décroît avec le temps, ou de manière équivalente en fonction de la distance depuis la source sonore. Comme on pouvait s'y attendre, cette perte par propagation dépend surtout de la géométrie, des profils de vitesse sonore et de la fréquence des vagues sonores. Depuis la solution de l'équation d'onde sphérique (équation 2.11), on sait que l'intensité du son d'un onde sphérique varie en inverse proportion du range au carré.

$$\frac{I(r, t)}{I(l, t)} = r^{-2} \quad (2.11)$$

La diminution de l'intensité sonore en fonction de la distance à la source est communément appelée perte par transmission TL , mesurée en dB et définie par :

$$TL(r) = 10\log\left(\frac{I(l, t)}{I(r, t)}\right) \quad (2.12)$$

$$TL(r) = 10\log\left(\frac{I(l, t)}{I(r, t)}\right) + a.r \quad (2.13)$$

$$TL(r) = 20\log(r) + a.r \quad (2.14)$$

$$TL(r) = 20\log(\min(r, r_0)) + y\log(\max(1, \frac{r}{r_0})) + a.r \quad (2.15)$$

$20\log(r)$ représente la perte par divergence géométrique et $a.r$ désigne l'atténuation fréquentielle.

Ces paramètres sont donc essentiels dans les méthodes incluant l'importance de la distance émetteur-récepteur. C'est le cas du modèle IFA développé notamment par Doh *et al.* en 2012 au sein du laboratoire LSIS. Cet algorithme IFA embarqué sur les bateaux du PNPC permettra de connaître la distance séparant l'hydrophone des cachalots présents avant même leur apparition en surface.

Dans le cas présent, le détecteur spectral s'affranchit de $TL(r)$ et n'intègre pas de motif fréquentiel de référence à la source.

2.2.3 Niveau de bruit

L'équation sonar met en relation le niveau du signal reçu avec le niveau du bruit de fond qui masque la détection du signal.

Ce concept de bruit est donc plus lié à ses effets qu'à sa description acoustique. Nous différencierons les interférences du bruit. Sont considérés comme "bruits" seulement les sons qui peuvent être décrits comme un processus aléatoire, parce que causés par un processus aléatoire ou par l'addition d'un grand nombre de signaux non-aléatoires.

Les causes du bruit peuvent être groupées en deux catégories :

- le bruit ambiant provient de l'extérieur du système. Il est indépendant du système d'enregistrement et de traitement. Les causes naturelles typiques sont le vent, les vagues, la pluie et animaux tandis que les causes anthropogéniques demeurent les activités maritimes et industrielles ... ;
- le bruit propre est généré par le système d'acquisition lui même et vient du bateau, des flux et chaleurs affectant les composants électroniques.

Niveau de bruit spectral : Le bruit, comme processus aléatoire, ne peut être décrit par des fonctions déterministes valables pour les signaux. Cependant le bruit peut être décrit par les intensités moyennes.

$$\bar{I} = \frac{1}{p_0 c} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t), dt \quad (2.16)$$

où $x(t)$ est la série temporelle du bruit et T le temps d'intégration, lequel est fixé pour garantir la convergence de l'intensité.

Par définition, le bruit est large bande. Pour caractériser le bruit, on peut quantifier la largeur pour laquelle le niveau de bruit est mesuré. En pratique, les séries temporelles bruitées $x(t)$ sont filtrées avec un filtre de largeur Δf autour d'une fréquence f_m aboutissant à une nouvelle série temporelle aléatoire $y(t)$.

La densité spectrale de cette nouvelle série temporelle est ensuite obtenue en estimant l'intensité moyenne et en divisant le résultat par la largeur de la bande. Ainsi, le niveau de bruit spectral en décibels devient :

$$NL_0(f) = 10 \log \left(\frac{1}{T \Delta f} \int_0^T Y^2(t) dt \right) \quad (2.17)$$

Le niveau de bruit spectral est mesuré en dB re $1 \text{ microPa}^2/\text{Hz}$. Il est fréquence-dépendant et permet une description générale du spectre du bruit. Comme le niveau de bruit spectral est estimé au moyen d'un filtre passe-bande, il est aussi important de noter la largeur du filtre, spécialement quand les filtres se chevauchent en fréquences. Même si le spectre du bruit est donné en Hz, les filtres de bruit sont typiquement plus larges que 1 Hz. Alors les filtres de bruit étroits génèrent plus de détails spectraux que les larges.

L'effet masquant du bruit : Pour obtenir le bruit masquant NL dans un récepteur large bande, le niveau de bruit spectral NL_0 est typiquement multiplié par la largeur de la bande, ou en termes décibels :

$$NL = NL_0(f_m) + 10 \log(B) \quad (2.18)$$

où f_m est la fréquence centrale du récepteur et B est la largeur de la bande du récepteur mesurée en Hz. Ceci, cependant, est seulement une approximation dans le cas où la bande d'analyse utilisée pour estimer le niveau de bruit est identique avec la bande B . Dans les cas où les récepteurs sont extrêmement largebande, il est nécessaire d'estimer le niveau de bruit masquant en intégrant directement le spectre du bruit dans la bande fréquentielle B .

$$NL = 10 \log \left(\int_B 10^{\frac{NL_0(f)}{10}} df \right) \quad (2.19)$$

Evidemment, pour un spectre de bruit constant, l'équation 2.19 se traduit par l'équation 2.18.

Bruit de surface : Le bruit de surface dans les mers et océans dépourvus de glace est majoritairement conduit par le vent et dépend de la vitesse du vent. Pour décrire le niveau de bruit ambiant entre 1 et 100 KHz (en dB re 1 $\mu Pa^2/Hz$), le modèle de Knudsen (Knudsen *et al.*, 1948; Lurton, 2002) peut être utilisé.

$$NL_{Surf_0}(f) = 44 + 23\log\{v + 1\} - 17\log\{\max(1, f)\} \quad (2.20)$$

où v est la vitesse du vent en m/s et f la fréquence en kHz.

Atténuation du bruit de surface avec la profondeur : Le bruit de surface, comme son nom l'indique, est généré par la surface de l'eau. La question est de savoir comment cette contribution au bruit varie avec la profondeur du récepteur. Deux effets apparaissent quand le récepteur s'éloigne d'une surface bruyante. D'abord, la contribution des sources de bruits individuels décroît à cause de la perte par propagation. Ensuite, le nombre de sources sonores de surface augmente d'autant plus qu'elles se situent dans la portée du récepteur (la portée de perception des bruits de surface par le récepteur s'accroît à mesure que sa profondeur augmente) et s'additionnent. En combinant les deux effets, on obtient l'expression suivante de l'effet de la profondeur sur le bruit généré en surface (Lurton, 2002).

$$NL_{Surf_0}(d, f) = NL_{Surf_0}(f) - a_f d - 10\log\left(1 + \frac{a_f d}{8.686}\right) \quad (2.21)$$

où d est la profondeur du récepteur, mesurée en mètres, et a_f le coefficient d'absorption en dB/m. La réduction dépendante de la profondeur devient significative aux plus grandes fréquences. Ainsi, le bruit surface-généré à une fréquence de 40 kHz arrive à un récepteur à une profondeur de 1 000 m avec 10 dB de moins qu'à 1 m de profondeur.

Bruits de bateaux : Le bruit (essentiellement éloigné) en provenance de bateaux est la principale cause du bruit ambiant. Dans l'archipel des Stoechades et la rade d'Hyères, le trafic maritime est important et continu.

En conséquence, notre détecteur de biosignaux filtre les bruits de turbines et d'équipements mécaniques ou électriques de navires. Le détecteur spectral présenté effectue plusieurs seuils successifs.

2.2.4 Seuil de détection

Le premier seuil extrait des enregistrements uniquement les valeurs de fréquences dont l'énergie est le maxima local par rapport à toutes les valeurs d'énergie de toutes les fréquences enregistrées à un bin donné.

Le second seuil extrait des maxima locaux ceux dont l'énergie est supérieure à une valeur seuil définie par rapport à la moyenne géométrique de l'énergie dans la séquence de l'enregistrement concernée.

Le troisième discrimine les signaux extraits (après les seuils 1 et 2) d'après leur forme dans le spectre temps-fréquence.

2.2.5 Gain de l'hydrophone

L'hydrophone utilisé est omnidirectionnel. En conséquence, il mesure avec le même effort le signal pour toutes les gammes de fréquence. Dans notre cas, le gain de l'hydrophone en dB est nul et peut être exclu de notre équation sonar.

2.2.6 Gain du système de traitement

Le système d'enregistrement (ordinateur portable sous distribution linux) ainsi que les algorithmes de traitements n'amplifient aucune fréquence. Dans notre cas, le gain du système de traitement en dB est nul et donc exclu de l'équation sonar.

2.3 Différentes valeurs de seuil pour éliminer les bruits continus non biologiques

Afin de finaliser ce détecteur, de le rendre totalement automatique et exact, des critères supplémentaires ont été intégrés. L'automatisation complète a permis également l'obtention de la courbe ROC, outil d'évaluation des performances de tout détecteur.

Pour construire les figures 2.12 à 2.21, nous faisons varier deux paramètres : *distt* et *distf*. Nous donnons pour quelques extraits choisis de 20 secondes, le résultat pour

- (dist t=5 et dist f=2). Cas que nous appelons conditions “laxistes” ;
- (dist t=1 et dist f=1). Cas que nous appelons conditions “drastiques”.

Dans la figure 2.11, le tableau de 4 x 4 cases représente le spectrogramme après binarisation. L'écart horizontal (écart fréquentiel) entre deux cases représente 187 Hz tandis que l'écart vertical (écart temporel) entre deux cases représente 2,7 millisecondes.

Dans les figures 2.12 et 2.13, le spectrogramme est bruité par un “TRIM”. Des critères plus drastiques ont réduit considérablement le nombre de fausses trajectoires détectées. Les trajectoires résiduelles sont alors éliminées car leur durée et pente moyenne diffèrent fortement de celles d'un voisement de dauphin. On constate avec satisfaction que dans ce cas-ci (figure 2.16 page 25), l'absence de signal dans le spectrogramme aboutit à une absence de détection

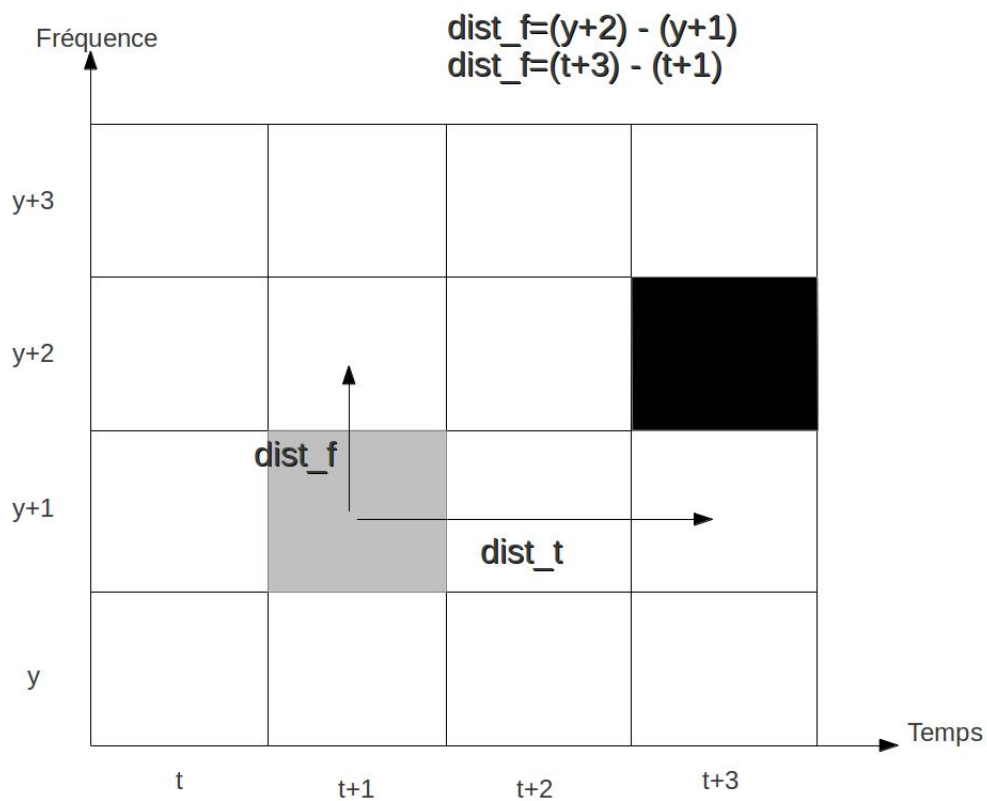


FIGURE 2.11 – Schématisation de deux paramètres : "dist t" et "dist f".

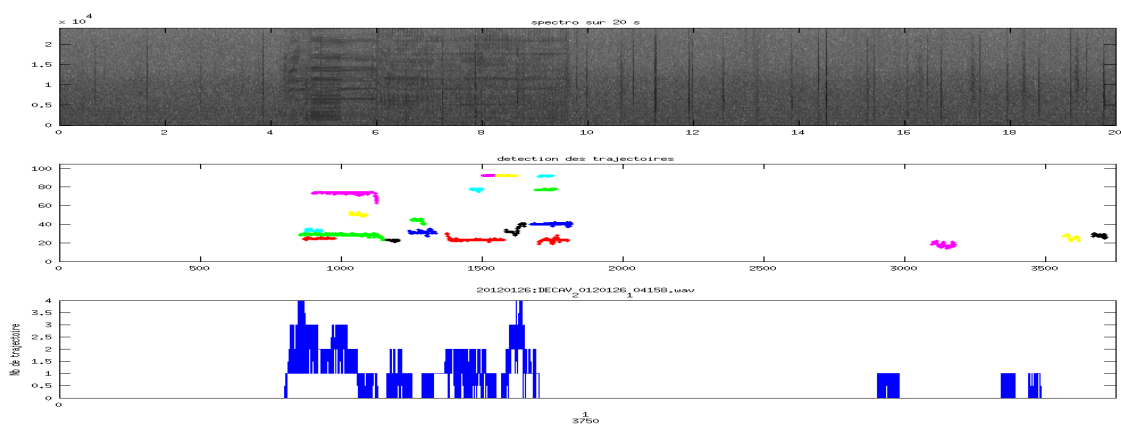


FIGURE 2.12 – DECAV 20120126 1041583 dist t = 5 et dist f = 2. Critères de continuité laxistes. De 4 à 10 secondes, un "trim" de hors bord.

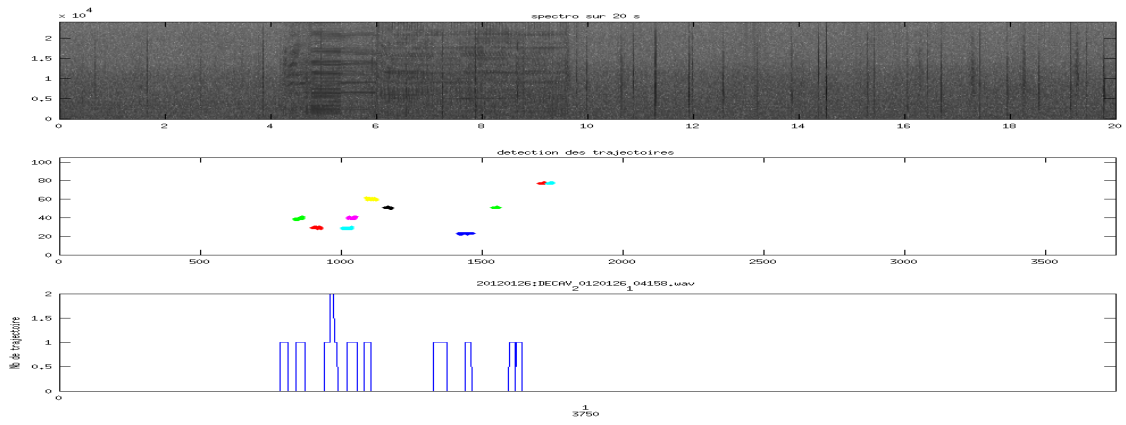


FIGURE 2.13 – DECAV 20120126 1041583 dist $t = 1$ et dist $f = 1$. Critères de continuité drastiques.

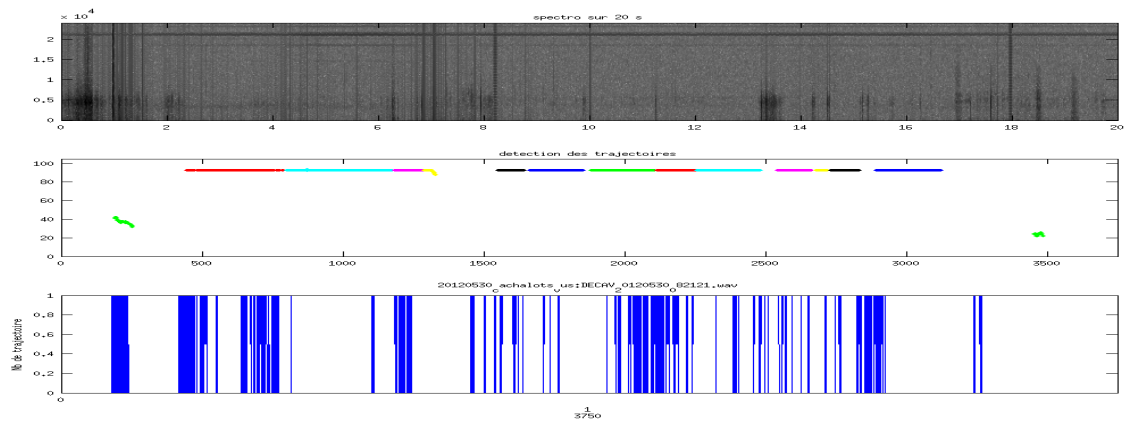


FIGURE 2.14 – 20120530 0821211 dist $t = 5$ et dist $f = 2$. Critères de continuité laxistes.

A environ 22 000 Hz, on observe un bruit continu dû à une erreur dans l'assemblage du système d'acquisition. Malgré un spectrogramme bruité d'évène-

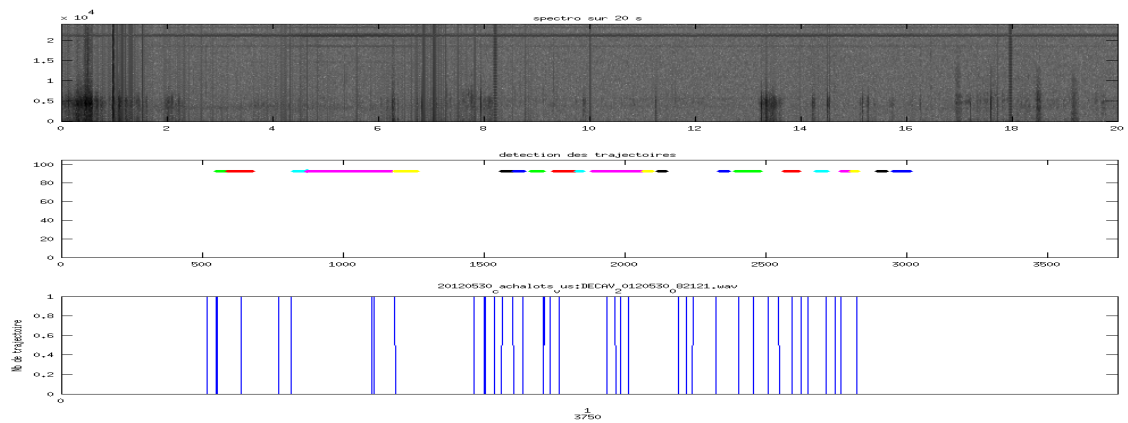


FIGURE 2.15 – 20120530 0821211 dist $t = 1$ et dist $f = 1$. Critères de continuité drastiques.

ments forts, les seules trajectoires retenues sont celles d'un bruit continu HF. Ces dernières sont horizontales et donc très vite exclues en aval.

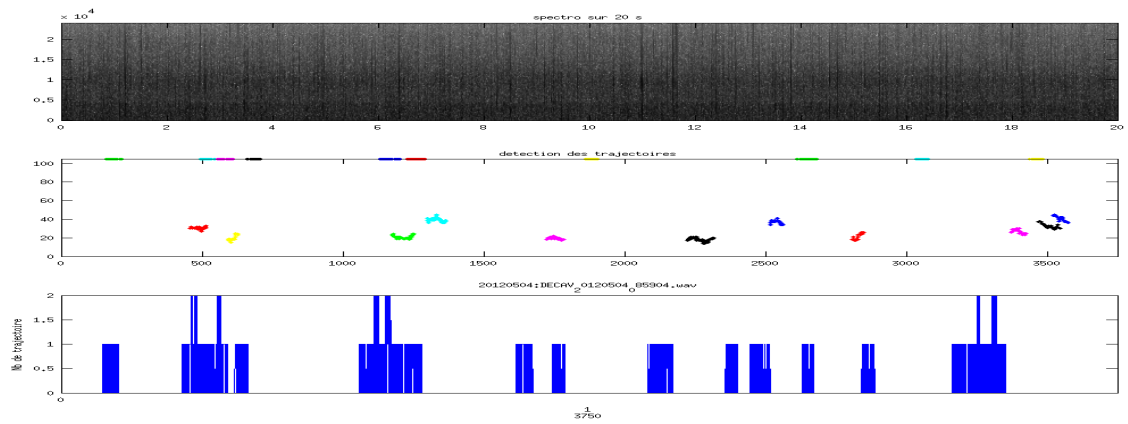


FIGURE 2.16 – 20120504 0859042 dist $t = 5$ et dist $f = 2$. Critères de continuité laxistes.

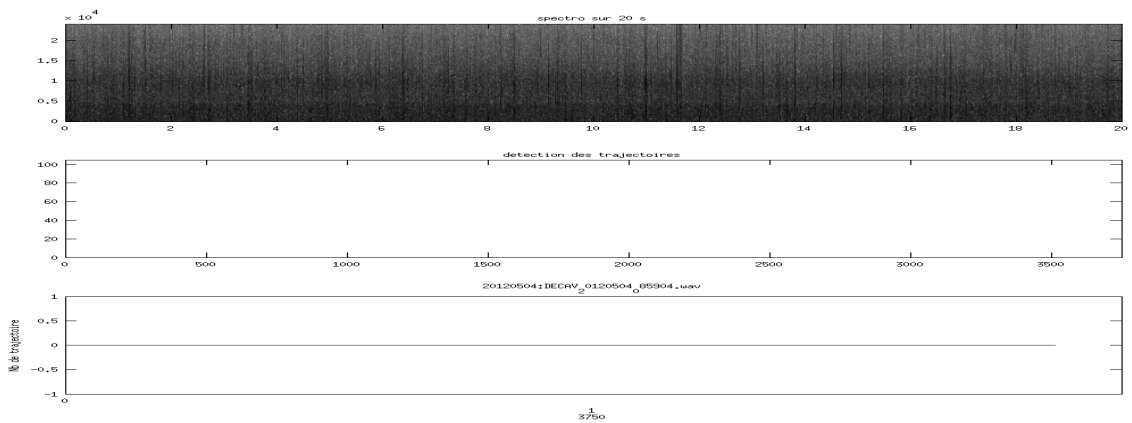


FIGURE 2.17 – 20120504 0859042 dist $t = 1$ dist $f = 1$. Critères de continuité drastiques.

Dans ce cas, des critères laxistes aboutissaient à l’assemblage en trajectoires de bruits ponctuels rapprochés dans le temps et en fréquence mais néanmoins discontinus. On remarque que le problème est résolu avec des critères plus exigeants.

Dans cet exemple isolé, les critères drastiques ont “tué” les fausses détections dues à un enregistrement de très mauvaise qualité, perdu 1 voisement mais conservé la séquence de bursts.

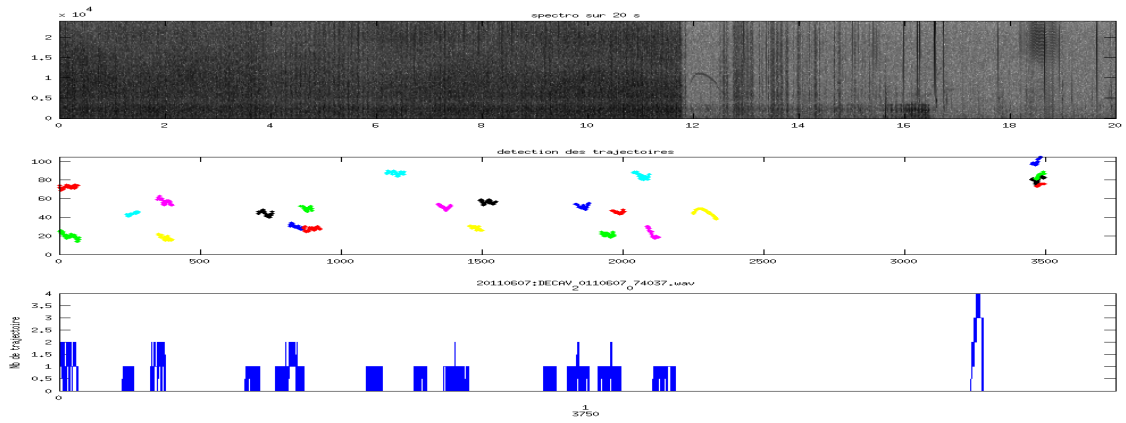


FIGURE 2.18 – DECAV 20110607 0740373 dist $t = 5$ et dist $f = 2$. Critères de continuité laxistes.

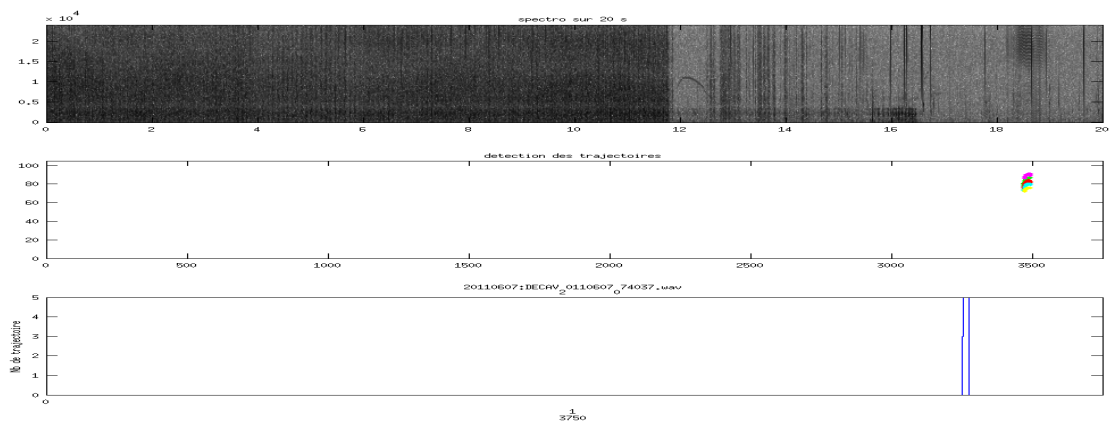


FIGURE 2.19 – 20110607 0740373 dist $t = 1$ et dist $f = 1$. Critères de continuité drastiques.

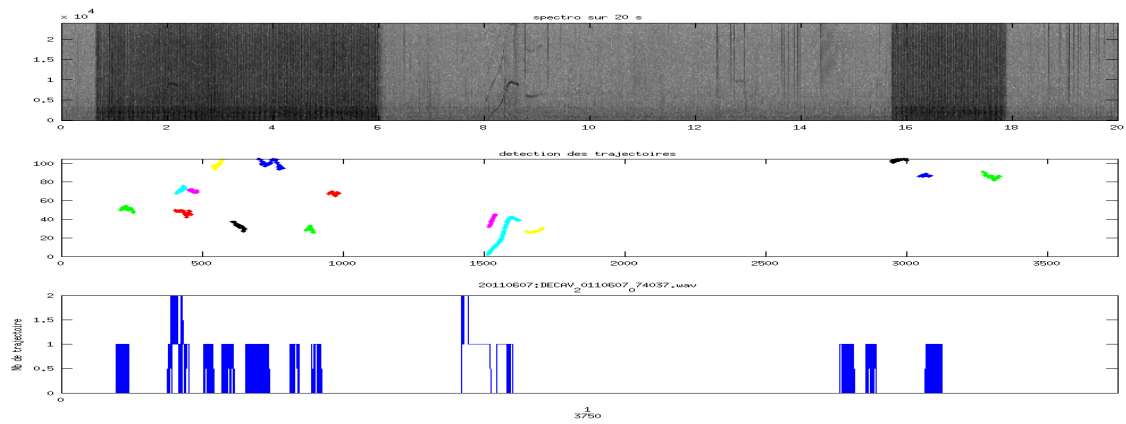


FIGURE 2.20 – 20110607 0740375 dist $t = 5$ et dist $f = 2$. Critères de continuité laxistes.

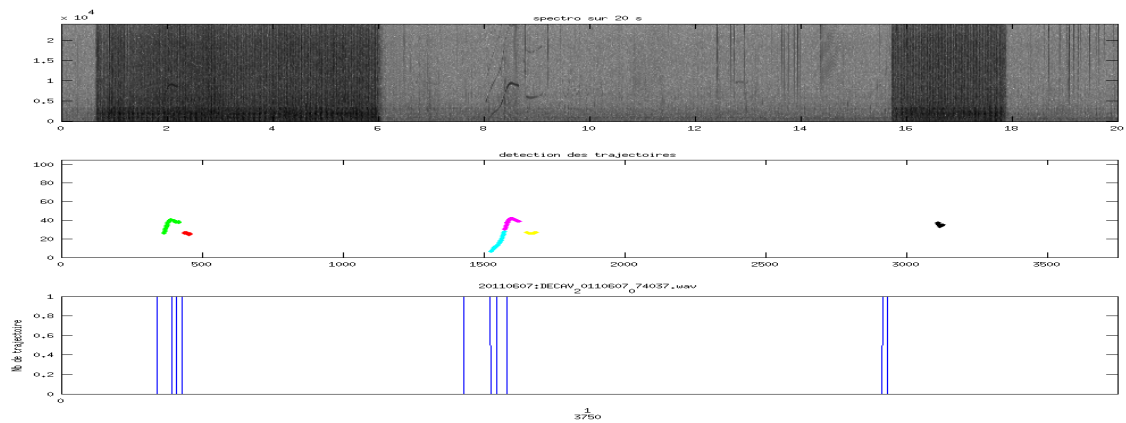


FIGURE 2.21 – 20110607 0740375 dist $t = 1$ et dist $f = 1$. Critères de continuité drastiques.

Ceci est un exemple de fichier fortement pollué duquel malgré tout l'algorithme réussit à extraire un voisement de dauphin invisible à l'oeil humain dans le spectrogramme et inaudible à l'écoute.

Le détecteur dans sa forme finale est donc capable de différencier les sons continus issus du démarrage électrique d'un moteur ou d'un trim de ceux consécutifs à un sifflement de dauphin.

2.4 Algorithme du détecteur spectral

Nous donnons ici l'organigramme synthétique de l'algorithme élaboré pendant le stage, en ayant intégré les propos précédents.

2.4.1 Schéma Algorithmique

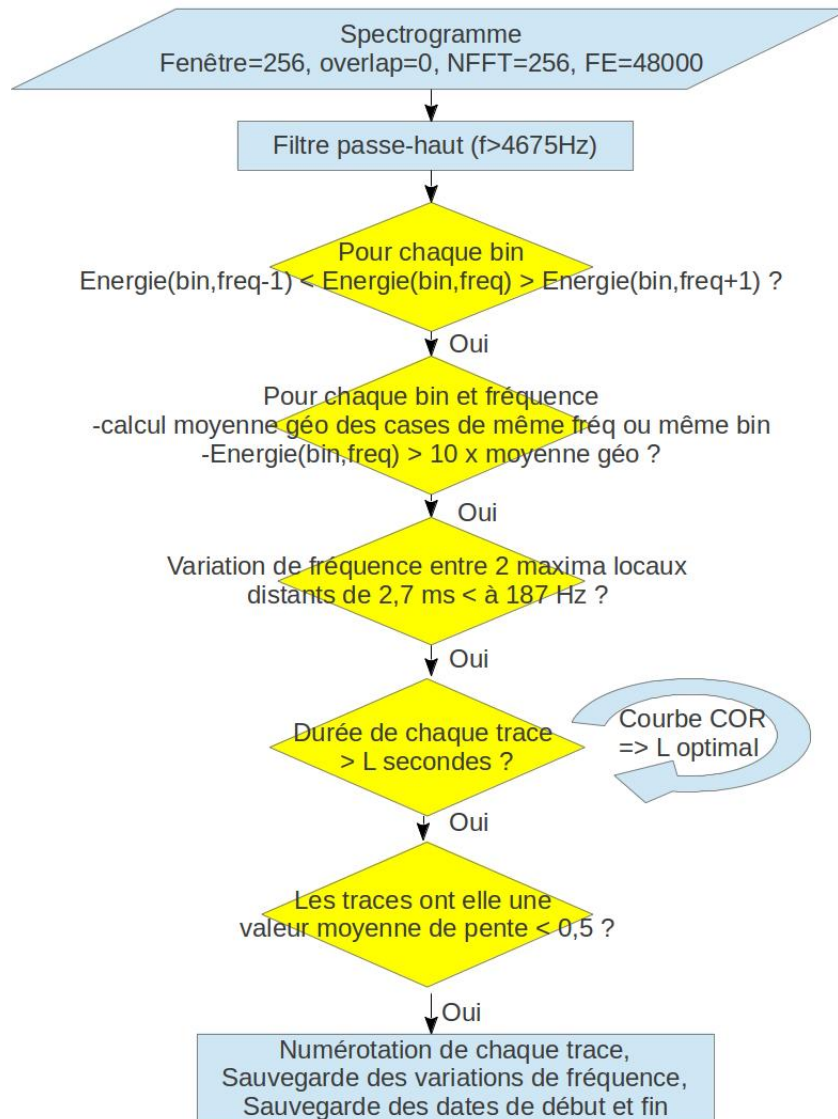


FIGURE 2.22 – Schéma algorithmique du détecteur spectral de voisements de delphinidés programmé sous Matlab.

2.4.2 Script, illustrations et commentaires

Le présent détecteur spectral est condensé en une fonction matlab. Ce détecteur est composé de plusieurs seuils et filtres. Leur valeur est modulable. Or l'essentiel des dauphins observés et enregistrés lors des sorties DECAV appartiennent à l'espèce *Stenella coeruleoalba* (Dauphin bleu et blanc). Pour cette raison, cette fonction traite un extrait sonore au préalable filtré par un filtre passe-haut à 4675 Hz (valeur tirée de la bibliographie actualisée en 1998 pour *Stenella coeruleoalba* [30]).

```
%spectrogramme
sig=v(1+(i-1)*fe*taille_fen:i*fe*taille_fen);
[y,f,t,p]=spectrogram(sig,256,0,256,48000,'yaxis');
```

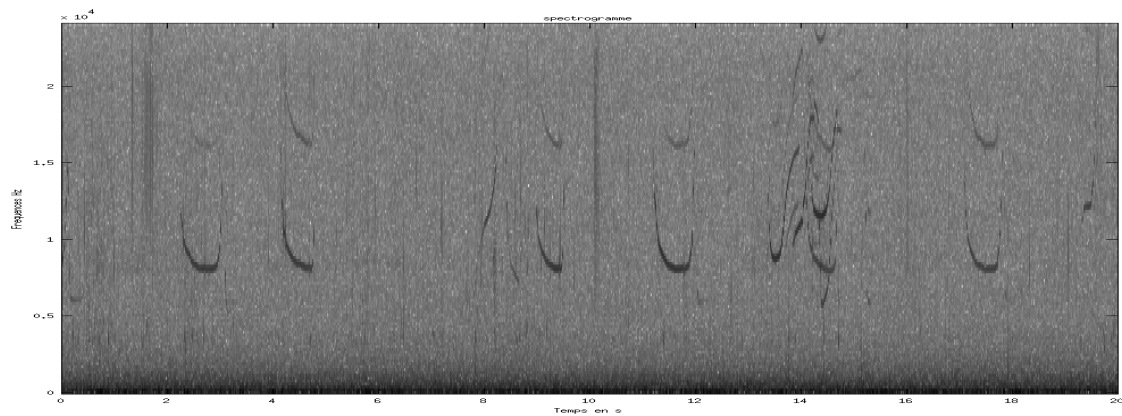


FIGURE 2.23 – Spectrogramme de 20 secondes contenant des signaux de delphinidés.

```
%filtrage des frequences (passe-haut 4675 Hz)
p=p(f_min:f_max,:);
[x y]=size(p);

% extraction des maxima locaux
[x y]=size(p);
max_loc=p.*(p>[zeros(1,y);p(1:x-1,:)]&p>[p(2:x,:);zeros(1,y)]);

% selection des max loc sup a un seuil par frequence
%rapport=10;
seuil=sqrt( exp(mean(log(p)')))*exp(mean(log(p))) )*rapport;
m=max_loc>seuil;

% detection des trajectoires par continuite
traj=zeros(size(p));
%clear max_loc
```

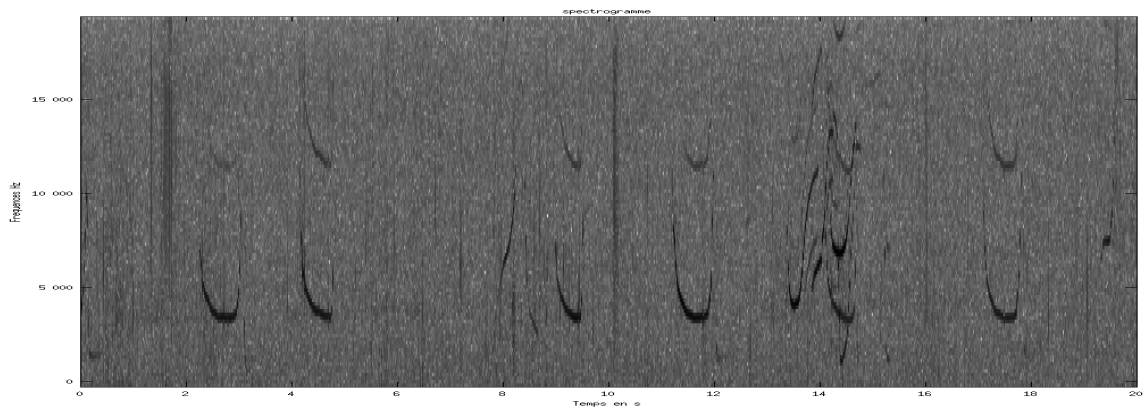


FIGURE 2.24 – Spectrogramme précédent filtré à 4675 Hz.

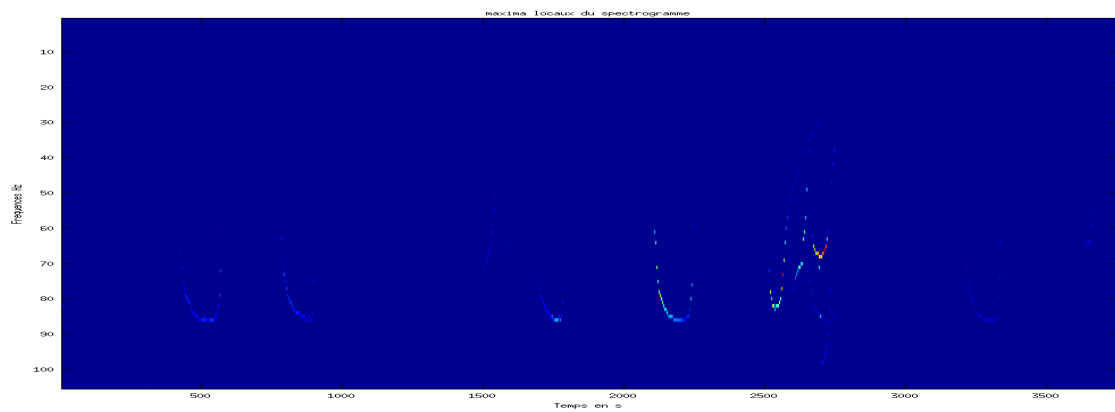


FIGURE 2.25 – Maxima locaux du spectrogramme filtré précédent.

```

tr=find(m(:,1));
traj(tr,1)=[1:length(tr)];
traj_max=length(tr);
nb_traj=ones(1,length(tr));
for j=2:size(m,2),
tr=find(m(:,j));
for k=1:length(tr)
traj_p=nonzeros(traj(max(1,tr(k)-dist_f):min(tr(k)+dist_f,
...      size(m,1)),max(1,j-dist_t):j-1));
if isempty(traj_p),
traj_max=traj_max+1;
traj(tr(k),j)=traj_max;
nb_traj(traj_max)=1;
else
[tr2_pos]=max(nb_traj(traj_p));

```

```

traj(tr(k),j)=traj_p(pos);
nb_traj(traj_p(pos))=nb_traj(traj_p(pos))+1;
end;
end;
so=sort(traj(tr,j));
doublon=so(find(so(2:end)==so(1:end-1)));
for k=1:length(doublon)
pos_doublon=find(traj(:,j)==doublon(k));
[pos_ex trr]=find(traj(:,max(1,j-dist_t):j-1)==doublon(k));
[trr pos]=sort(abs(pos_doublon-pos_ex(end)));
traj(pos_doublon(pos(end)),j)=traj_max+1;
nb_traj(traj_max+1)=1;
traj_max=traj_max+1;
nb_traj(doublon(k))=nb_traj(doublon(k))-1;
end;
end;

```

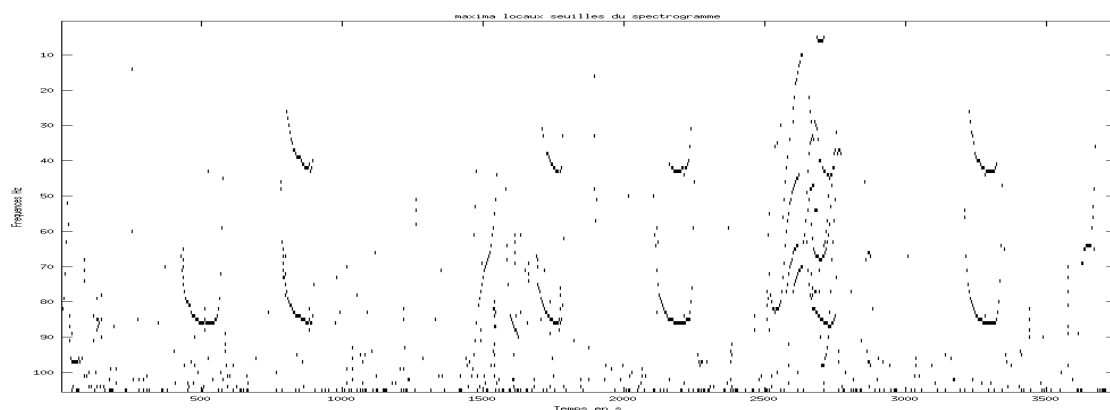


FIGURE 2.26 – Maxima locaux formant des trajectoires continues. Les maxima locaux isolés ont été exclus.

```

% tri des trajectoires sur crit\{'e}re
... de leur acc\{'e}l\{'e}ration moyenne et de leur dur\{'e}e
for i=1:max(traj(:))
[x y]=find(traj==i);
taille_traj(i)=length(x);
garde=0;
if taille_traj(i)>taille_traj_min & max(x)>20
vitesse=diff(x)./diff(y);
acc(i)=mean(abs(diff(vitesse)./(y(3:end)-y(1:end-2))));
acc_max(i)=max(abs(diff(vitesse)./(y(3:end)-y(1:end-2))));
%disp([acc(i) acc_max(i)]);
if acc(i)<0.5 % & max_acc(i)<3
garde=1;

```

```

end;
end;
traj(find(traj==i))=garde*i;
end;
couleurs=['.b';'.g';'.r';'.c';'.m';'.y';'.k']; cpt=1;
if max(traj(:))>0,
traj_gard=find(hist(traj(:),[1:max(traj(:))]));
else traj_gard=[];
end;

```

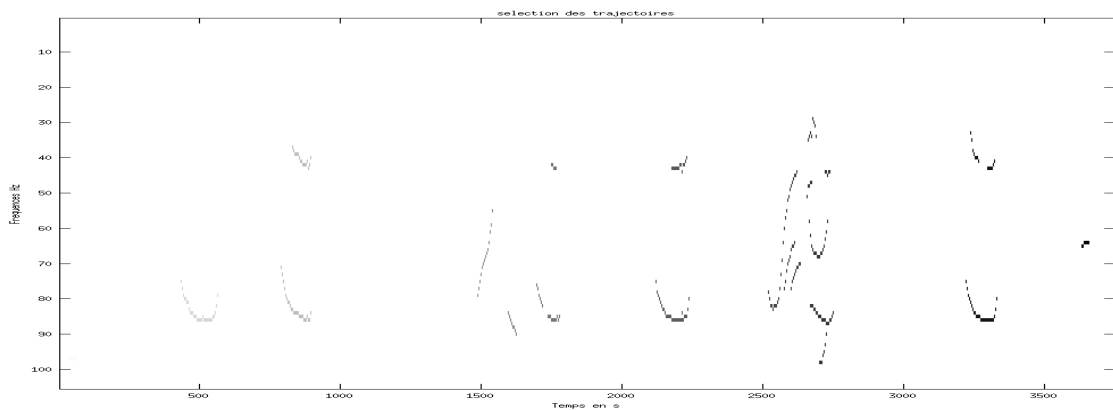


FIGURE 2.27 – Trajectoires continues dont la durée et l'accélération moyenne sont respectivement supérieures à 53,3 ms (valeur optimale d'après la courbe COR.) inférieures à 0,5.

Ces 5 valeurs chiffrent au total 3 critères. Le premier critère correspond à la valeur énergétique minimale que peut avoir le signal. Le second critère s'intéresse à la continuité des points extraits du spectrogramme après le premier critère. Le second critère exclut des résultats du premier critère les points étant isolés d'une distance supérieure à *dist* (*dist* étant modulable). Après le second critère, l'algorithme a transformé le spectrogramme en une matrice binaire le représentant. Les deux axes de cette matrice représentent respectivement les valeurs de fréquences et le temps en bin. Quand une case vaut 0, c'est qu'elle ne satisfaisait pas les critères précédents. Les cases dont la valeur est de 1 présentent une continuité dans la dimension temporelle et fréquentielle. Ces cases de 1 s'organisent en segments curvilignes dont la forme est celle des voisements de dauphins difficilement visibles à l'oeil nu dans un spectrogramme du signal bruit. Le troisième critère s'intéresse à la longueur des segments : il désigne comme signal les segments dont la longueur est supérieure à une valeur long (long étant modulable).

2.5 Courbe COR (Caractéristiques Opérationnelles de Réception)

2.5.1 Efficacité du détecteur

Cette courbe COR a été obtenue en faisant varier

- la durée minimum des trajectoires retenues ;
- entre $5 \times 2,7\text{ms}$ ($=13,65\text{ms}$) à $110 \times 2,7\text{ms}$ ($=300,3\text{ms}$) ;
- par pas de $1 \times 2,7\text{ms}$.

Sur la figure 2.28, chaque point correspond à un taux de détections positives correctes (axe des ordonnées) et un taux de fausses détections positives (axe des abscisses) obtenus pour une valeur de seuil L donnée. La meilleure valeur de L , d'un point de vue qualité de la détection, est celle donnée par le point le plus proche de la droite $f(x) = -x + 1$.

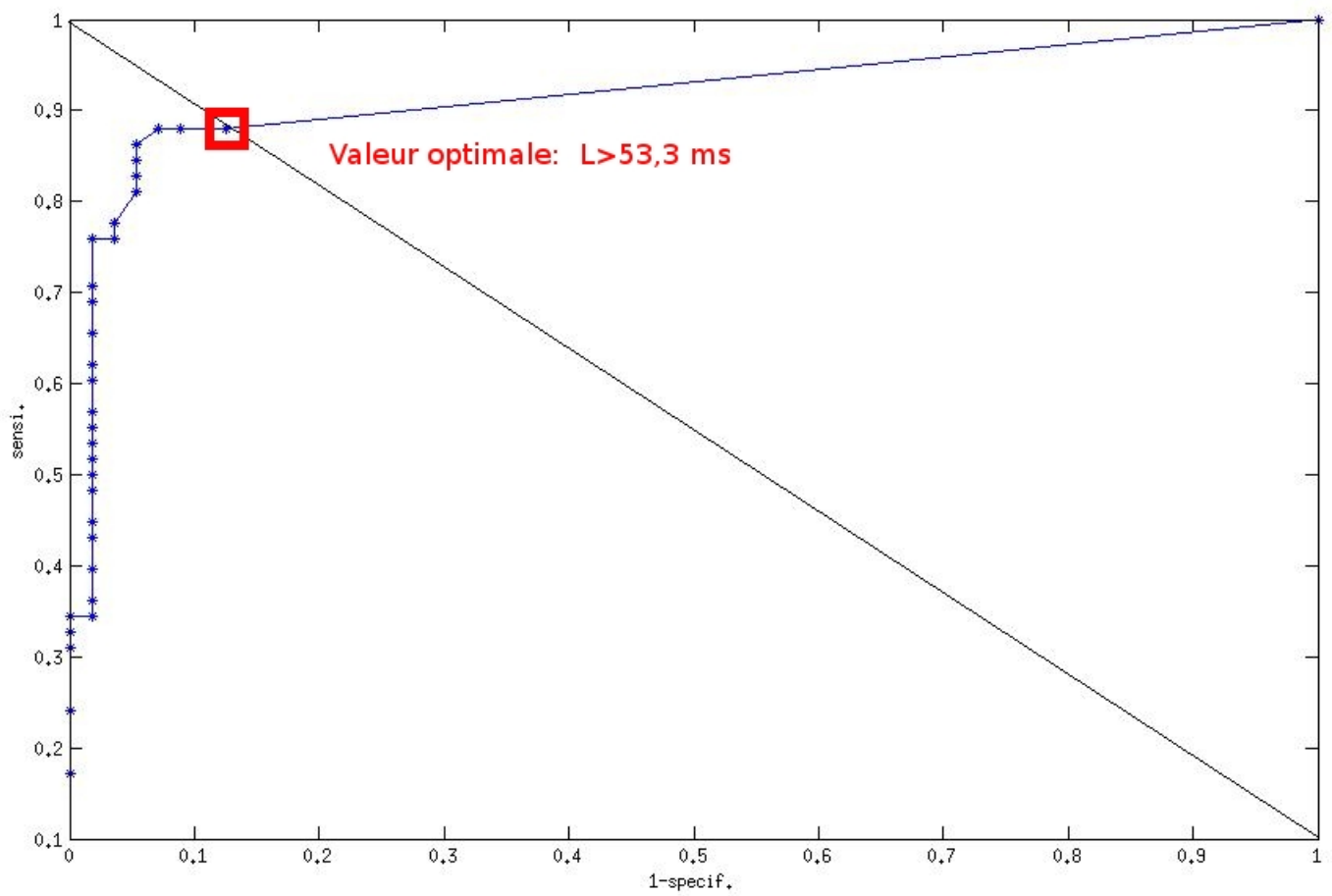


FIGURE 2.28 – Courbe des caractéristiques opérationnelles de réception (Courbe COR) du détecteur spectral de sifflements de dauphins.

D'après la courbe COR de la figure 2.28 page 34 :

- Le présent détecteur spectral donne des résultats tout à fait satisfaisants ;
- Nous connaissons la valeur optimale de seuil à retenir pour la suite de l'analyse.

En l'état actuel des choses, la différenciation à l'espèce des signatures de dauphins est semi-automatique. L'algorithme matlab que nous avons construit permet à n'importe quel intervenant de connaître automatiquement dans une base de données les dates auxquelles il y a voisement de dauphin. Etant donné que l'algorithme extrait et enregistre la forme de chacun de ces voisement, il laisse au cétologue comme à l'agent de terrain la possibilité de consulter le "catalogue" de signatures spectrales que contient la banque de données.

2.5.2 Valeur optimale de seuil

Le détecteur algorithmique présenté dans ce rapport comprend plusieurs niveaux de seuil (voir schéma algorithmique).

Pour tracer la courbe COR, il est nécessaire de trouver un paramètre tel que :

- une diminution de sa valeur entraîne une diminution du nombre de détections de signaux d'intérêt ;
- une augmentation de sa valeur entraîne une augmentation du nombre de détections de signaux d'intérêt.

Ce détecteur spectral extrait d'un spectrogramme des signaux bandes étroites continus. Le paramètre retenu est celui de la durée L de ces signaux. La courbe ROC révèle que les meilleurs résultats obtenus en terme de détection le sont pour L égal à 53,3 ms.

	Cachalots		Delphinidés	
Date	Vus/Aperçus	Enregistrés	Vus/Aperçus	Enregistrés
2011/05/06	0	1	Oui	Détection : positive
2011/05/19	0	1	Oui	Détection : positive
2011/06/07	0	0	S.c	S.c
2011/07/12	0	0	Non	Non
2011/07/28	0	0	S.c.	Détection : positive
2011/08/02	1	2	Non	Non
2011/08/31	0	1	Non	S.c
2011/09/16	0	0	S.c et C.g	Détection : positive
2012/01/26	0	2	S.c	Détection : positive
2012/03/16	0	0	Non	Détection : positive
2012/03/26	0	0	non renseigné	Détection : très peu probable
2012/05/04	0	1	T.t	T.t
2012/05/30	1	3	Non	Détection : négative
2012/06/06	0	1	Non	Détection : très peu probable
2012/06/07	0	0	Non	Détection : négative
2012/06/15	0	0	S.c	Détection : négative
2012/06/28	0	0	Non	Détection : négative
2012/07/11	1	3	Non	Détection : positive
2012/07/23	0	0	non renseigné	Oui
2012/08/02	0 *	1	non renseigné	Oui
2012/08/15	2 **			
2012/08/19	1 **			
2012/08/23	0	0		
Total	4	16		

FIGURE 2.29 – Résumé des détections visuelles et acoustiques de cétacés à dents du 06/05/2011 au 11/07/2012. S.c : *Stenella coeruleoalba*, le dauphin bleu et blanc. C.g : Dauphin de Risso. T.c : *Tursiops truncatus*, le grand dauphin. Oui : espèce pas encore différenciée acoustiquement. A noter que l'observation visuelle de dauphins n'a pas systématiquement été suivie d'une écoute hydrophonique. Ceci est dommageable pour l'étude de l'espèce et des groupes polyspécifiques relativement fréquents en Méditerranée.

2.6 Résultats

2.6.1 Distribution temporelle de l'abondance en dauphins

Voici le graphe (voir figure 2.27) représentant la variation mensuelle des détections acoustiques de delphinidés sur l'année 2011.

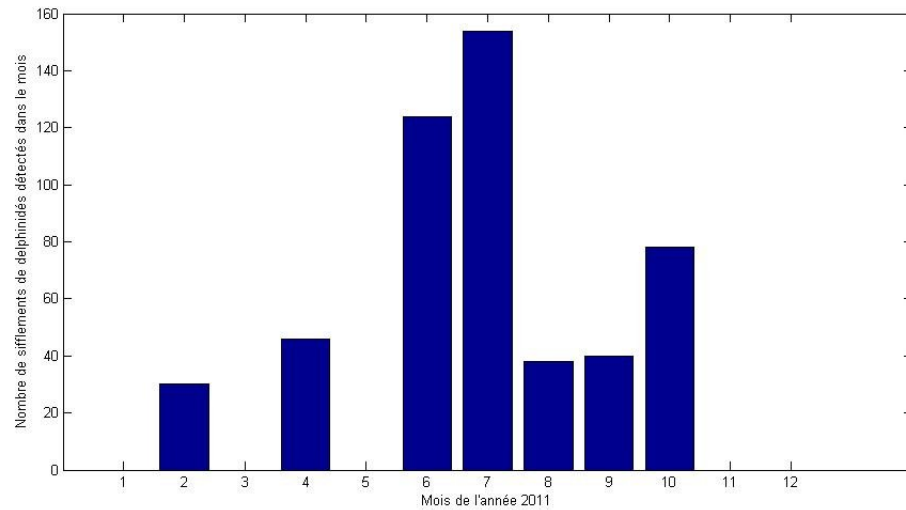


FIGURE 2.30 – Variations mensuelles des détections acoustiques de delphinidés en 2011.

2.6.2 Signatures inter et intra spécifiques de dauphins

Détection rarissime de *Tursiops truncatus*, le grand dauphin

Le 04/05/2012, ont été observés 2 individus adultes ainsi qu'un juvénile de 8h13 à 8h50 (heure à laquelle la piste a été perdue). Le spectrogramme d'un enregistrement réalisé à 09h07 à quelques centaines de mètres de là révèle un signal bande étroite (voir figure 2.31). Lequel prouve la détection acoustique de cette espèce pour cette journée. Le rapport signal sur bruit est si faible que le détecteur n'a rien relevé.

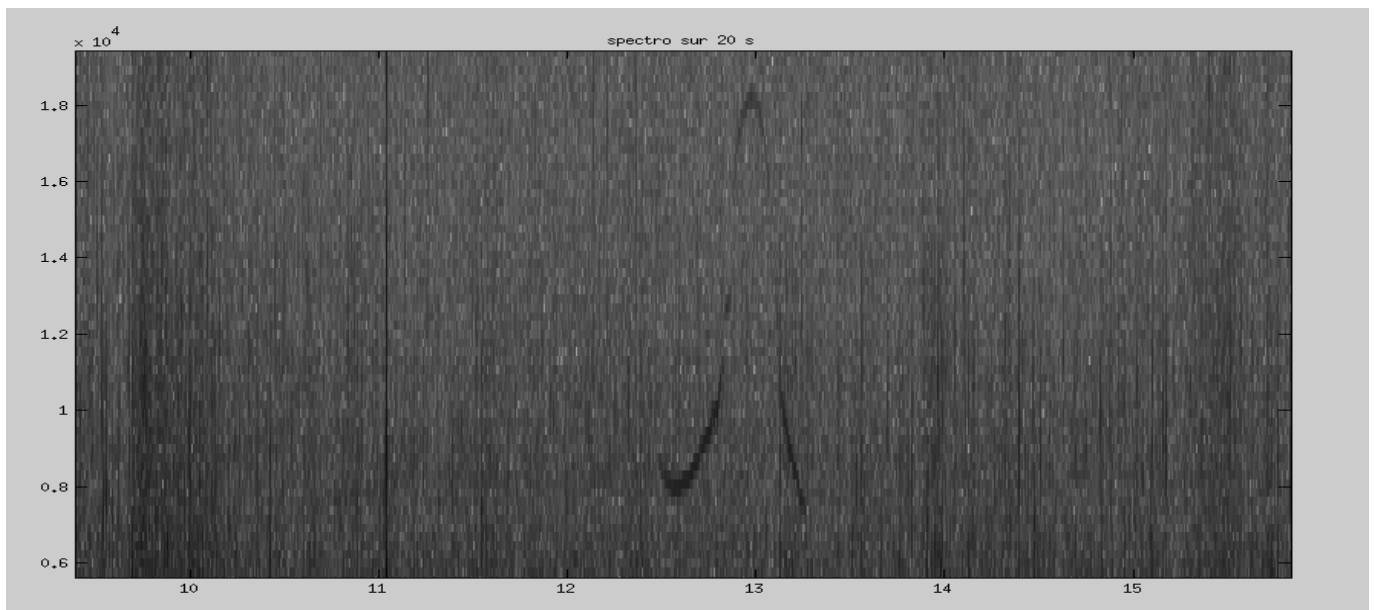


FIGURE 2.31 – Sifflement de grand dauphin, *Tursiops truncatus*

Comment les voisements de dauphins sont-ils construits ? D’ores et déjà les efforts déployés par le LSIS et le PNPC permettent une première analyse sur les sifflements de dauphins bleus et blancs (*Stenella coeruleoalba*). Dans un premier temps, nous présentons quelques motifs élémentaires. Dans un second temps, nous montrons comment ces signaux élémentaires semblent s’imbriquer pour former des signaux plus complexes, des “compositions”. Enfin, nous réfléchissons à une quantification de l’abondance en dauphins acoustiquement présents fondée sur l’alternance d’intervalles silencieux ou d’intervalles “actifs”.

Motifs spectraux élémentaires de *Stenella coeruleoalba*

Stenella coeruleoalba produit la plupart du temps des sifflements hautes fréquences compris entre quelques KHz et plus de 20 KHz, avec une durée normale d’une seconde, et des clics d’écholocation avec des pics d’énergie entre 50 et 150 KHz. Il peut produire des sifflements et des clics en même temps. Il émet aussi des séries de clics très rapprochés appelés “bursts”.

Il n’est pas rare de rencontrer le Dauphin de Risso avec d’autres espèces d’odontocètes, selon les mers ou les océans : grands dauphins, dauphins communs, dauphins bleus et blancs, globicéphales, marsouins de Dall, lagénorhynques à flancs blancs du Pacifique, dauphins tachetés, faux orques, orque pygmée et même cachalots. La rencontre avec des mysticètes n’est pas non plus exclue. En Méditerranée, de tels groupes ont été observés (Alexandre Gannier, GREC).

Dans l’extrait de 20 secondes de la figure 2.32, est visible le motif élémentaire en “U”, long d’une seconde et répété 5 fois. Ces 5 sifflements sont probablement une sorte de message d’alarme (Halkias, 2009) et révèlent la présence d’au moins deux individus.

Les figures 2.33 à 2.37 présentent d’autres motifs répertoriés dans d’autres séquences analysées : slash, antislash, serpentiforme...

Les figures 2.39 à 2.46 suggèrent que les *Stenella coeruleoalba* assemblent les motifs spectraux élémentaires pour créer des signaux plus complexes. Elles montrent des séquences composées de chacun de ces motifs élémentaires.

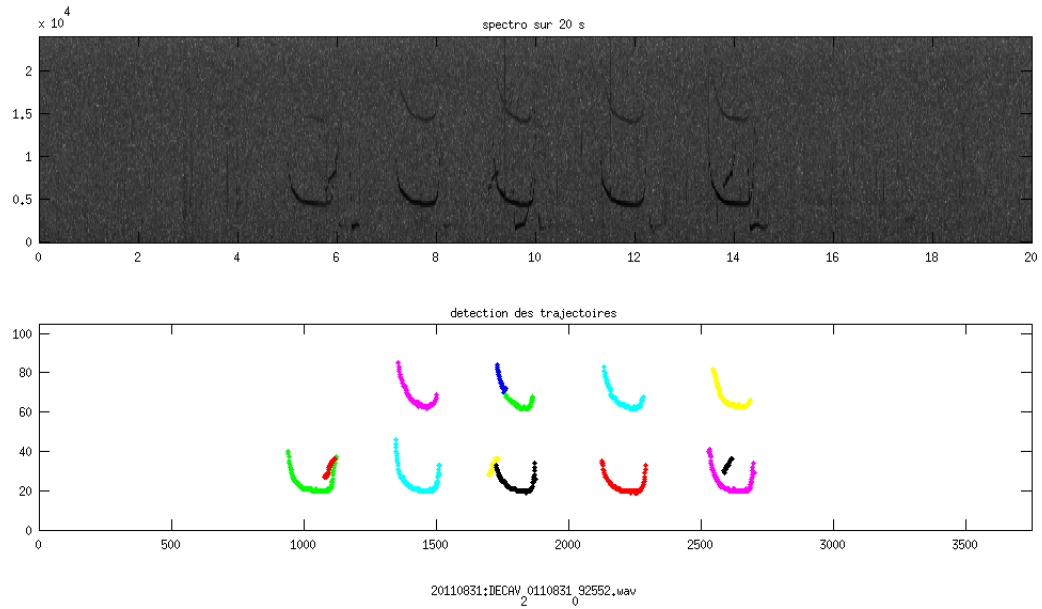


FIGURE 2.32 – Motif élémentaire en “U”

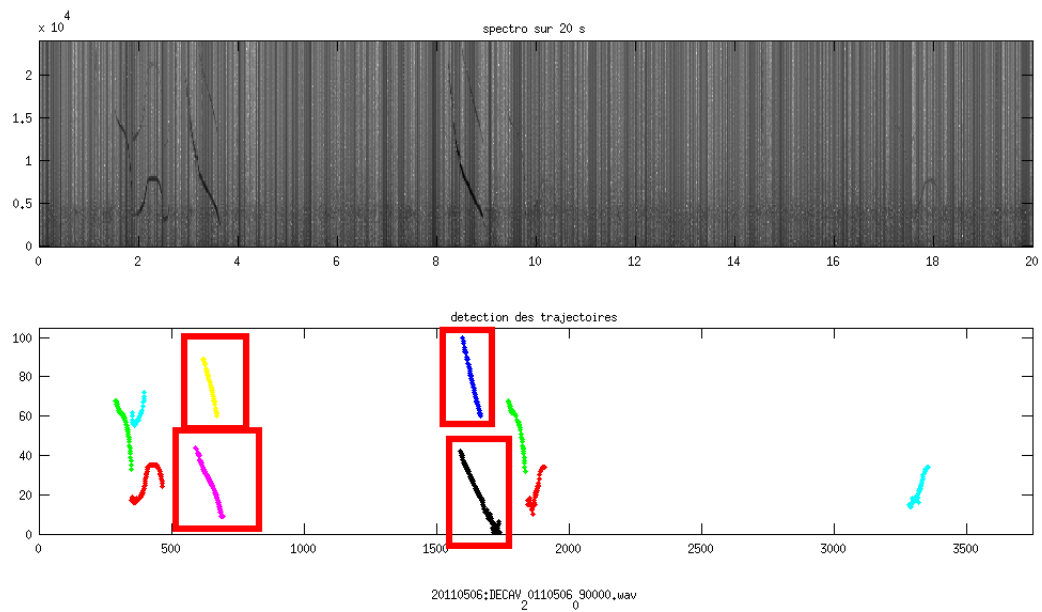


FIGURE 2.33 – Motif élémentaire en “antislash”

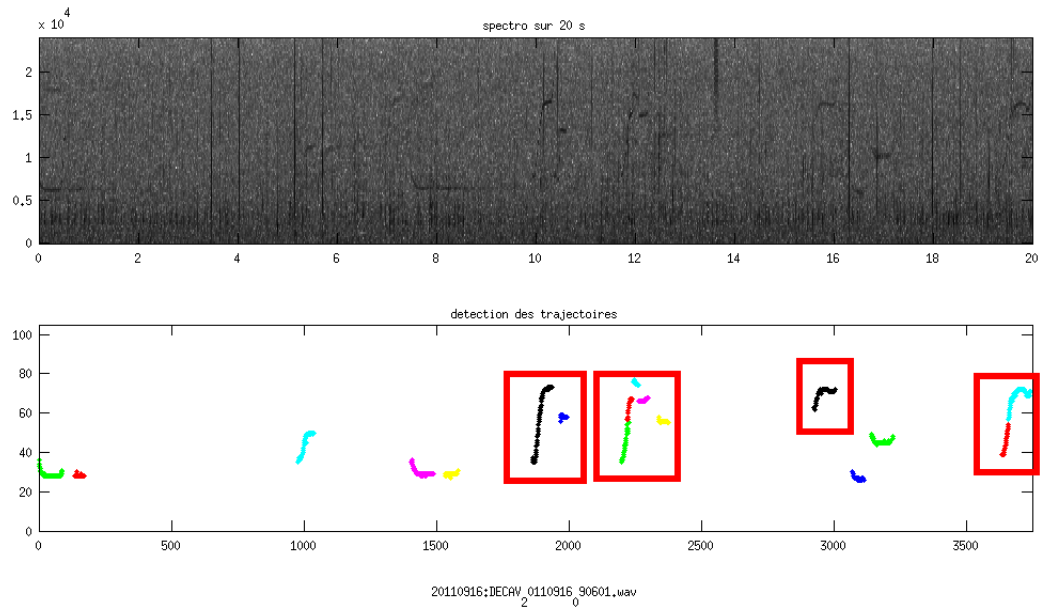


FIGURE 2.34 – Motif élémentaire constitué d’une montée puis d’un plateau.

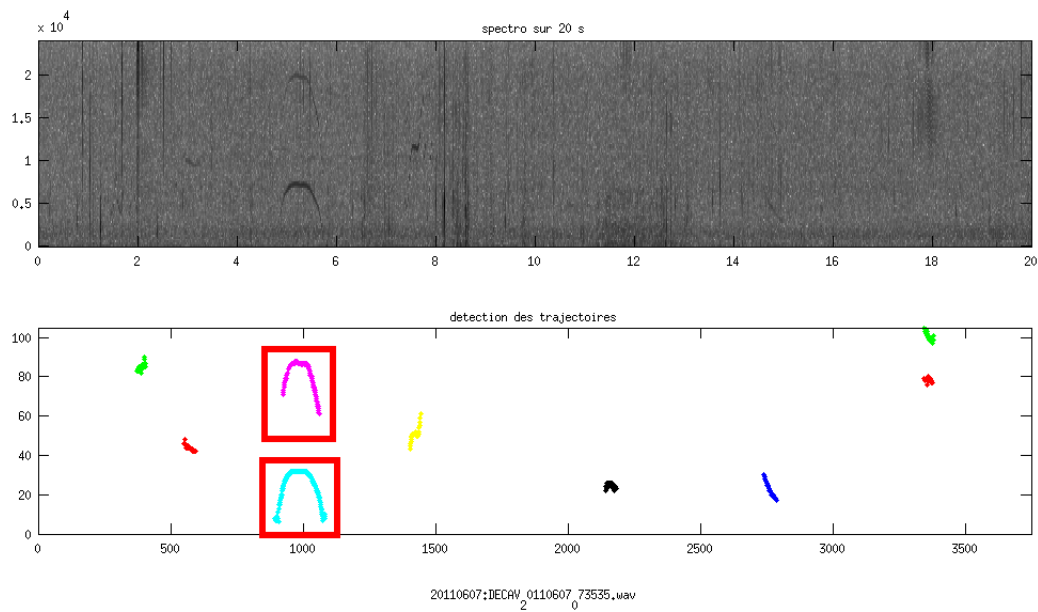


FIGURE 2.35 – Motif élémentaire “en dôme”

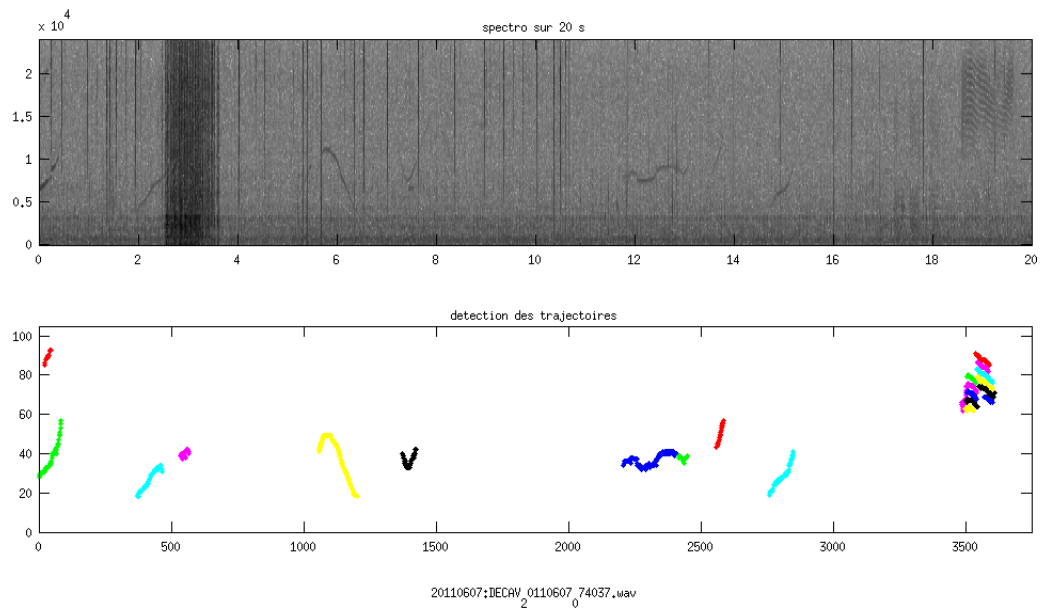


FIGURE 2.36 – Motif élémentaire serpentiforme

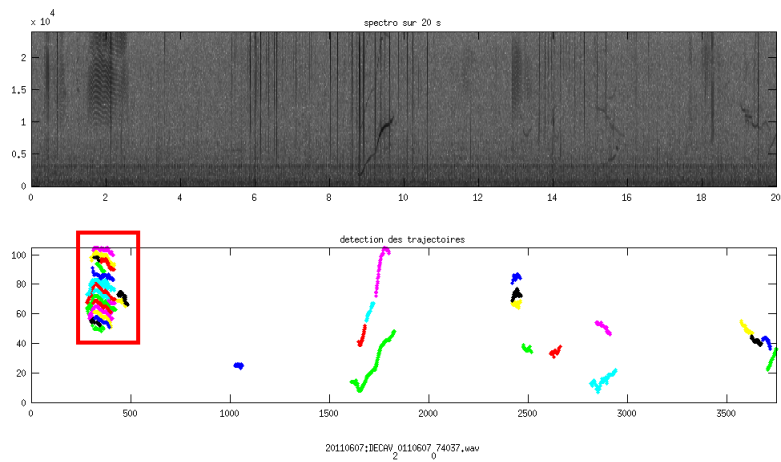


FIGURE 2.37 – Motif élémentaire "burst"

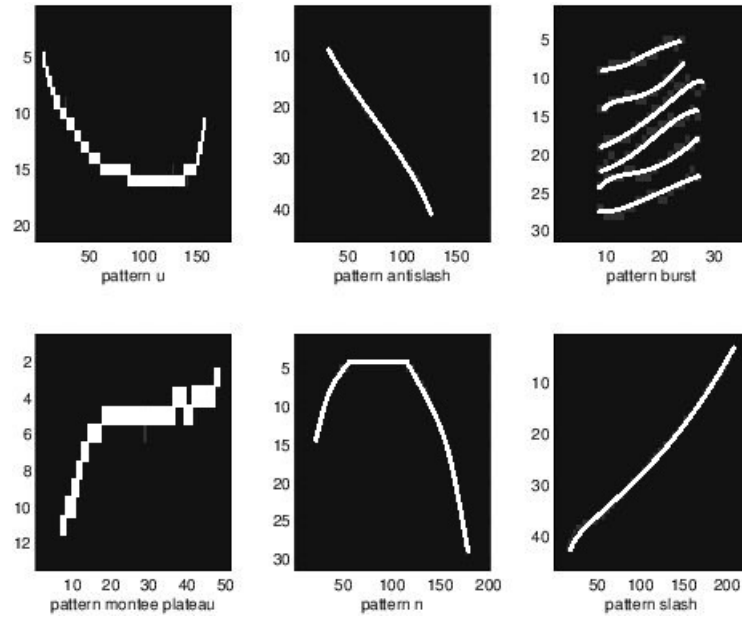


FIGURE 2.38 – Liste des motifs élémentaires les plus répandus dans les enregistrements DECAV 2011 et 2012

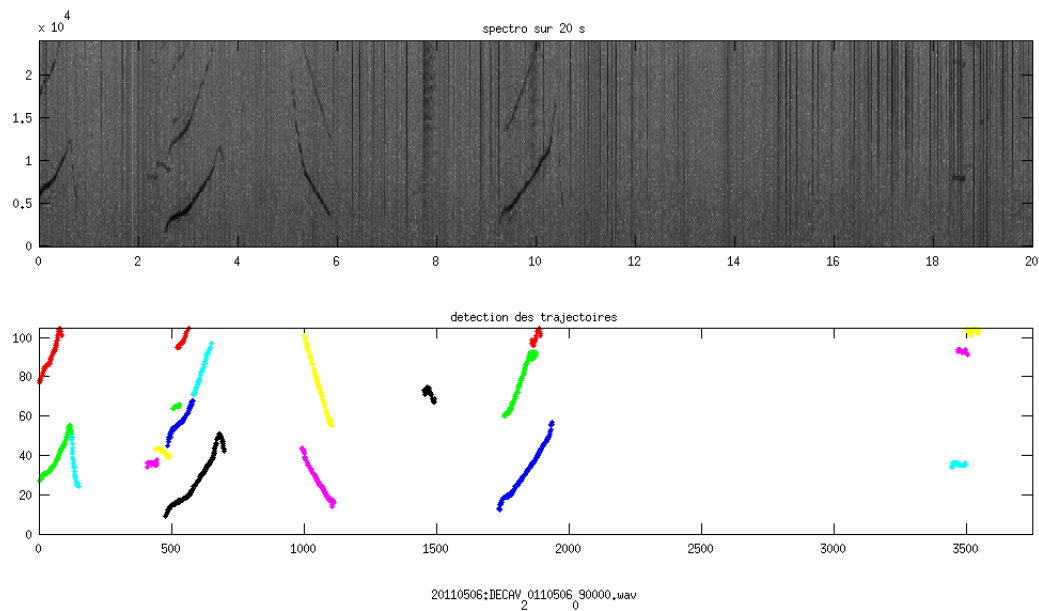


FIGURE 2.39 – Spectrogramme temps-fréquence d'un enregistrement réalisé le 06/05/2011 à 09h00

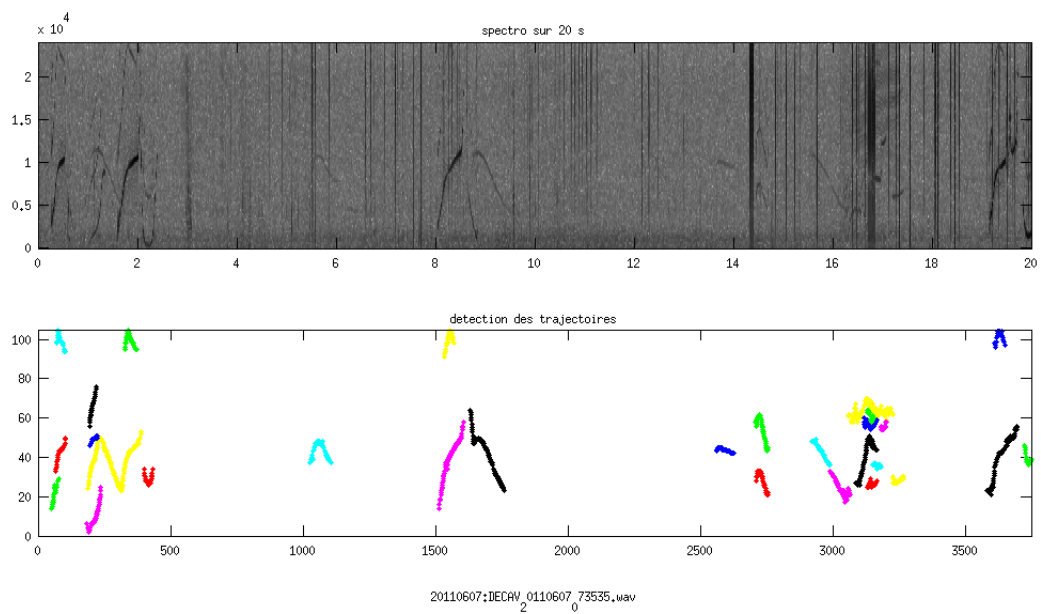


FIGURE 2.40 – Spectrogramme temps-fréquence d'un enregistrement réalisé le 07/06/2011 à 07h35

Motifs spectraux complexes de *Stenella coeruleoalba*

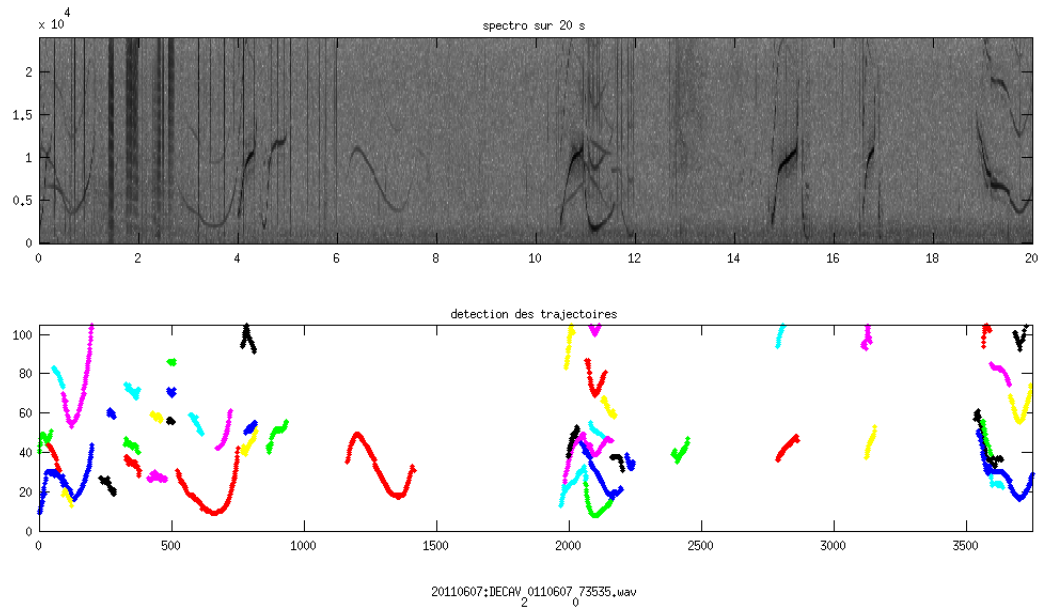


FIGURE 2.41 – Spectrogramme temps-fréquence de 20 secondes le 07/06/2011 à 07h35m55s

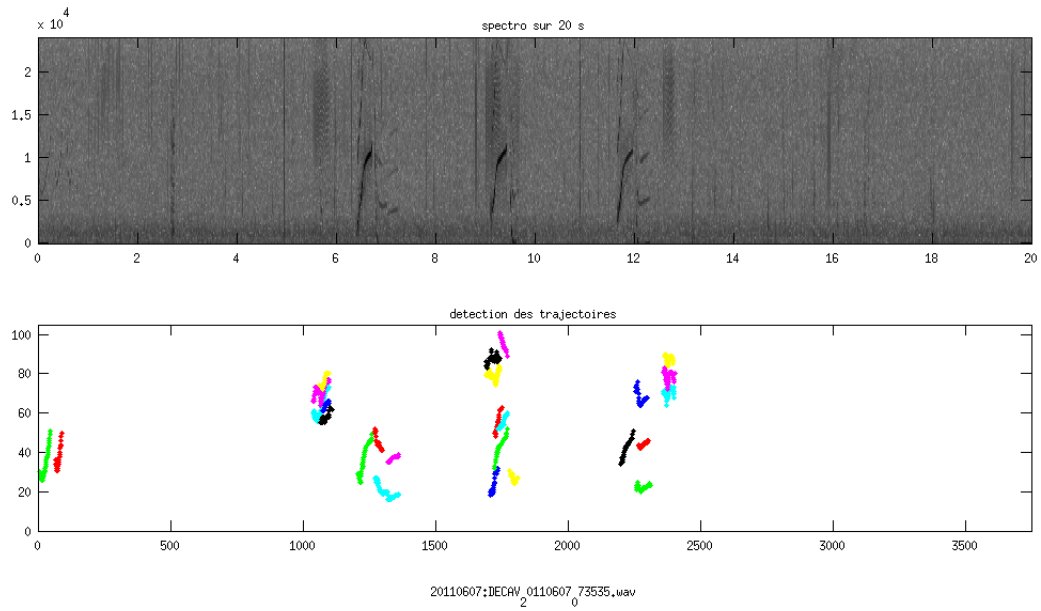


FIGURE 2.42 – Spectrogramme temps-fréquence de 20 secondes le 07/06/2011 à 07h36m15s

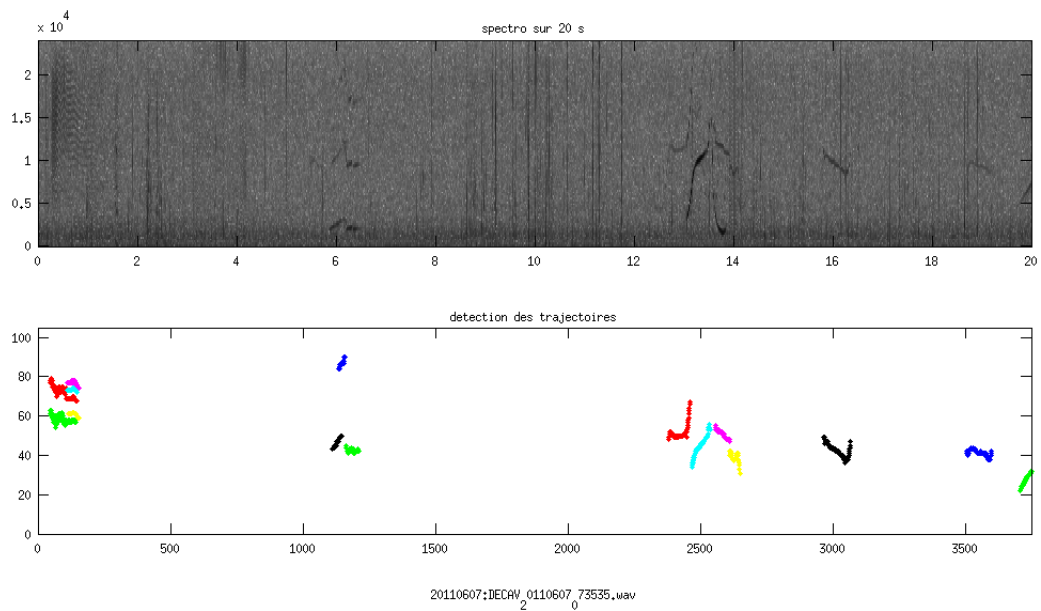


FIGURE 2.43 – Spectrogramme temps-fréquence de 20 secondes le 07/06/2011 à 7h36h35s

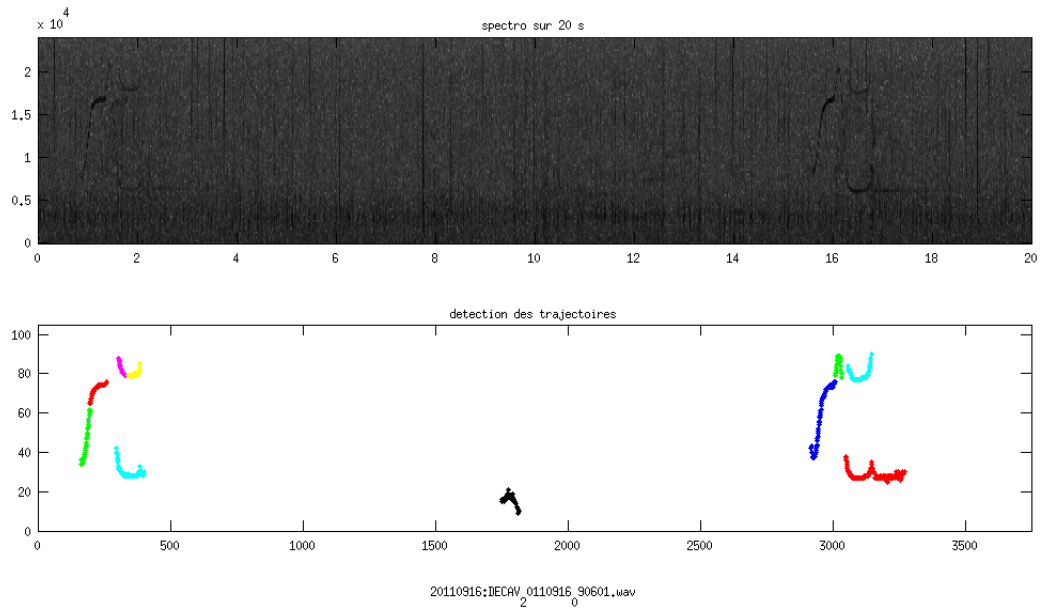


FIGURE 2.44 – Spectrogramme temps-fréquence de 20 secondes le 16/09/2011 à 09h06m01s

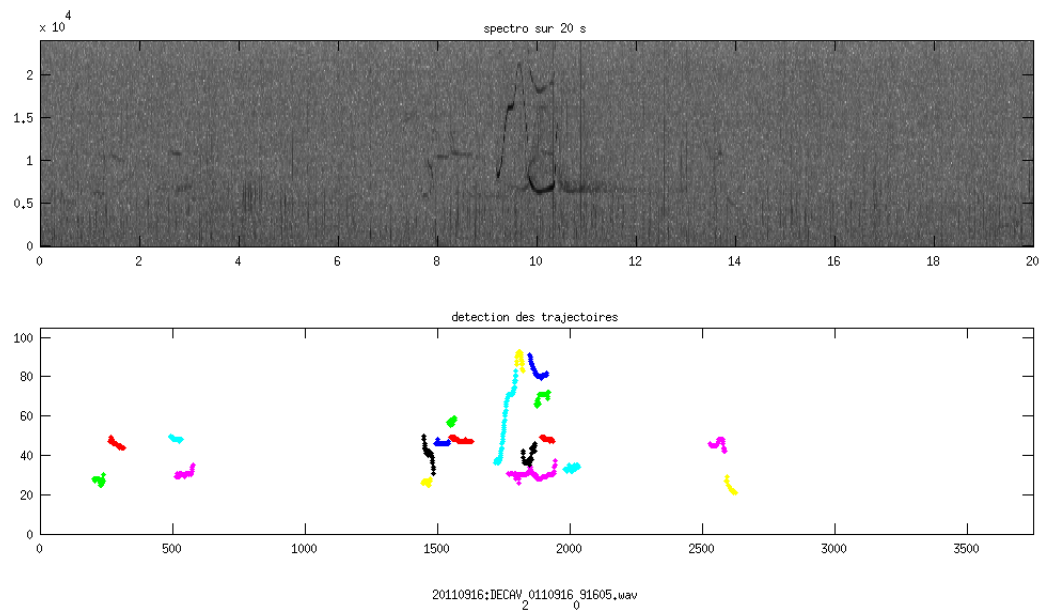


FIGURE 2.45 – Spectrogramme temps-fréquence de 20 secondes le 16/09/2011 à 09h16m05s

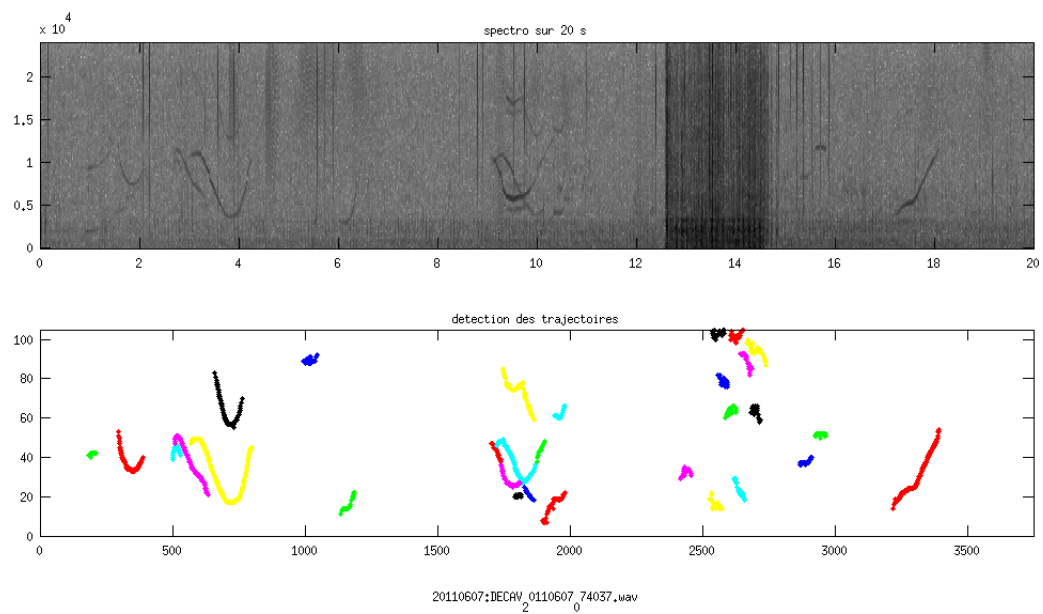


FIGURE 2.46 – Spectrogramme temps-fréquence de 20 secondes le 07/06/2011 à 07h40m37s

2.7 Conclusions et perspectives

Nous avons précisé dans ce chapitre la construction complète d'un système sonar passif efficace de suivi des signaux temps-fréquences de dauphins ou de tout autre cétacé siffleur. Nous avons montré les émissions caractéristiques et combinatoires. Les séquences d'enregistrement pourraient nous permettre de compter les individus acoustiquement actifs. Ceci parce que nous observons (voir figures 2.47 et 2.48) des plages de silence et de signaux (par intervalles d'environ 2 secondes). De même, tout chevauchement de formes extraites par le détecteur indiquerait la présence de plusieurs individus.

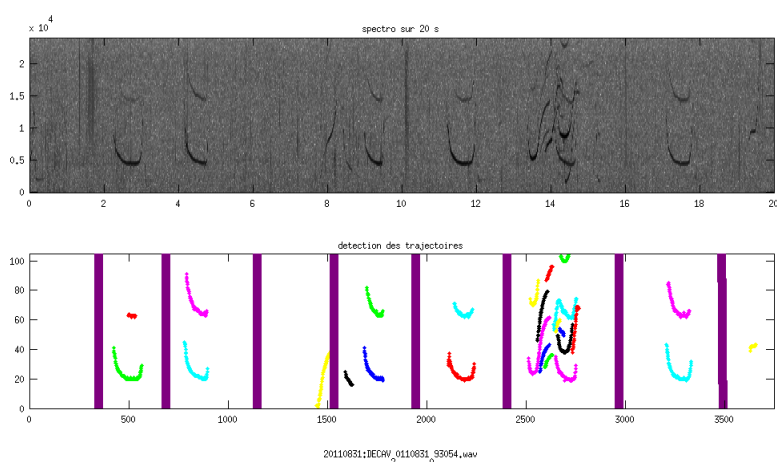


FIGURE 2.47 – Spectrogramme temps-fréquence de 20 secondes le 31/08/2011 à 09h30m54s

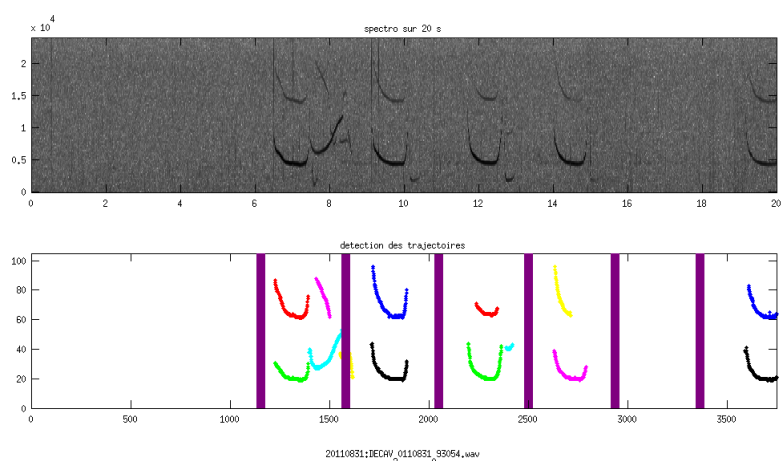


FIGURE 2.48 – Spectrogramme temps-fréquence de 20 secondes le 31/08/2012 à 09h30m54s

De plus, nous pensons que la répartition des signaux dans le temps et l'espace nous donne les moyens de caractériser l'activité des individus. Voici (figure 2.49)

un répertoire rapide dans l'espace des motifs principaux que l'algorithme a mis en évidence pendant les sorties DECAV. Nous y remarquons des ensembles à confirmer et préciser notamment grâce au projet BOMBYX.

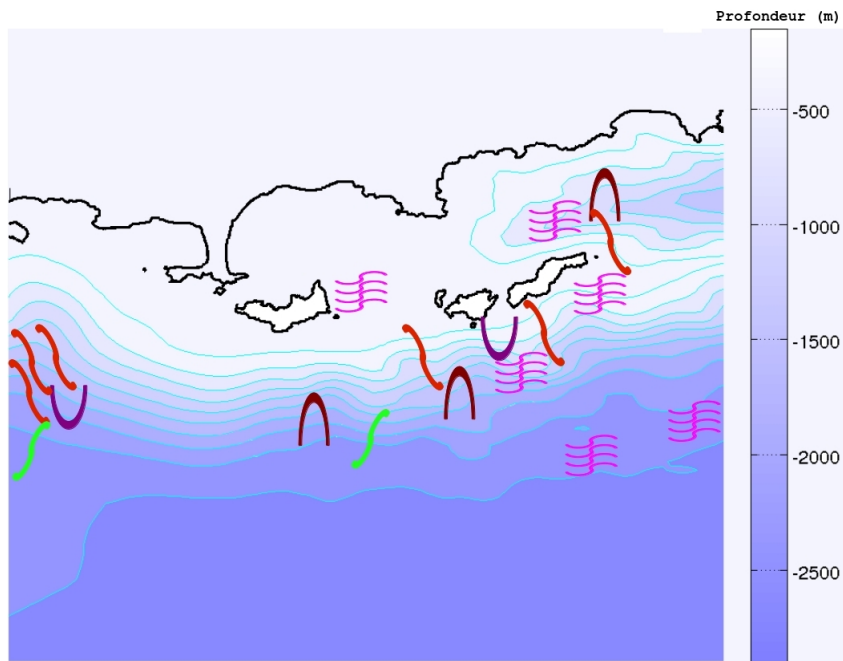


FIGURE 2.49 – Bathymétrie et cartographie des signaux de *Stenella coeruleoalba* de l'archipel des Stochades

Chapitre 3

Identification acoustique de cétacés : applications aux cachalots

3.1 Introduction

Cette partie tend à rendre compte de l'étude sur la détection et l'analyse des signaux de cachalots. Pour chaque sortie, les fiches terrains, la cartographie des transects et les résultats remarquables, s'il y a lieu, sont consignés à l'adresse URL suivante :

<http://sis.univ-tln.fr/~glotin/sabiod/decav/>

Lors des sorties avec le Parc National, des points d'écoutes sont effectués le long des transects afin de faire des enregistrements audio du milieu. Dans ces enregistrements, des émissions de cachalots peuvent être captées et permettre les protocoles suivants :

- La détermination de la distance de l'animal avec l'hydrophone par le modèle d'IFA = "Inter Frequency Attenuation" (thèse de Mr Doh [12],[13]). Ce modèle encore en cours de test donne des résultats encourageant avec par exemple lors de la sortie du 2 août 2011 un animal aperçu à environ 1 mille (1 852 mètres) du bateau et dont l'estimation donnait une distance d'environ 2 000 mètres.

- La détermination de la taille de l'animal par le modèle MOVIP = "Mono-variate IPI" (thèse de M. Abeille), IPI signifiant interval interpulse (se reporter à la partie suivante pour de plus amples explications). Ce modèle original est en cours de soumission dans la revue PLOS ONE et permet de mesurer pendant les prospections la longueur des cachalots. Ce procédé se base sur la structure multipulsée du clic. Ses résultats ont été validés sur des enregistrements des Bahamas et de NEMO-ONDE (Université de Pavi - laboratoire du CIBRA dirigé par Gianni Pavan) par comparaison avec d'autres méthodes de l'état de l'art tel que le spectre ...

La suite de cette partie contiendra les résultats obtenus, leur illustration sera par ailleurs mise en annexe sauf pour le cas servant d'exemple afin de ne pas alourdir la lecture.



FIGURE 3.1 – *Physeter macrocephalus*, le cachalot (îles d'Hyères, 30/05/2012).

3.2 Estimation des tailles

Pour comprendre le principe du calcul de la taille du cachalot il faut dans un premier temps connaître le mode de fonctionnement de l'organe de production sonore de cet animal.

Comment un cachalot émet-il un clic ?

1/ Le cachalot utilise ses lèvres phoniques présentes dans le *museau du singe* comme une source acoustique omnidirectionnelle.

2/ Les ondes sonores émises sont réfléchies par le sac distal, une partie d'entre elles étant envoyées vers une masse graisseuse nommée le junk.

3/ Les ondes traversant le junk sont amplifiées, focalisées et directionnelles. Elles sont ensuite émises en un faisceau dirigé dans le milieu marin.

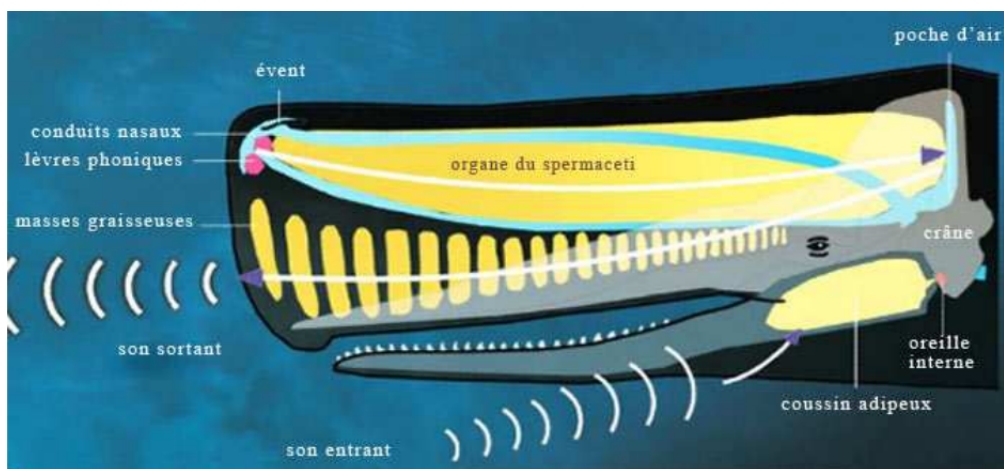


FIGURE 3.2 – Coupe transversale virtuelle de la tête d'un cachalot. Schéma d'origine : Museum of New Zealand Te Papa Tongarewa.

La figure précédente illustre bien les différentes étapes de la production sonore mais ne tient pas compte des multiples fuites sonores qui apparaissent pendant ce trajet. Ce schéma doit être complété pour expliquer le caractère multipulsée du clic.

Pourquoi le clic est multipulsée ?

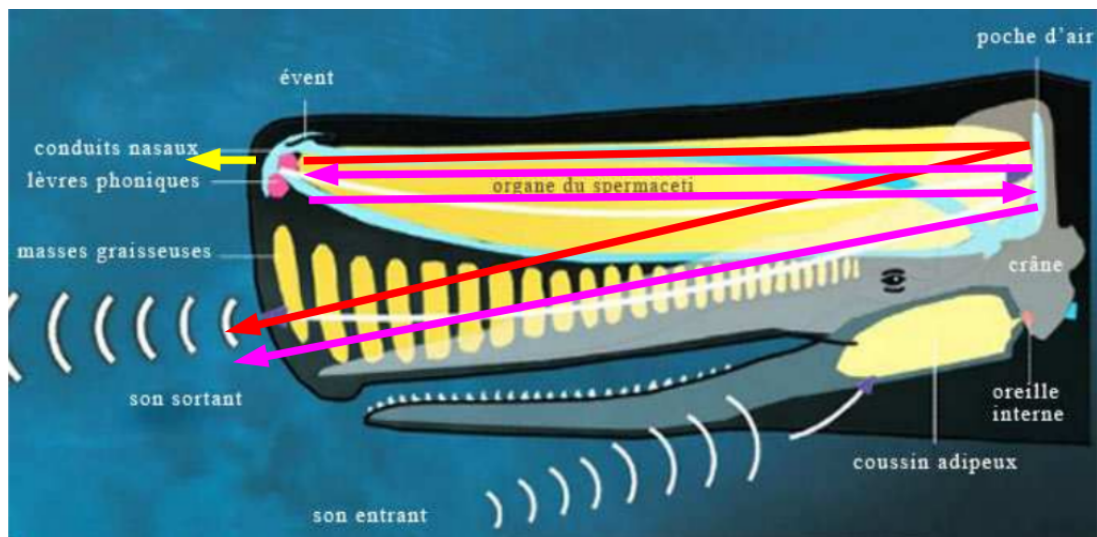


FIGURE 3.3 – Coupe transversale virtuelle de la tête d'un cachalot montrant les différentes réflexions sonores pour une même impulsion. Schéma d'origine : Museum of New Zealand Te Papa Tongarewa.

En jaune, la première fuite ou “pulse 0” (P0) qui sort de l’animal représente une faible partie du son produit par les lèvres phoniques qui ne passe pas par le spermaceti.

Le reste de l’impulsion mère produite par les lèvres phoniques passe par le spermaceti et se réfléchit sur le sac frontal. Une partie des réflexions passent par le junk pour ensuite être émises dans le milieu marin. Ceci est représenté par le trajet en rouge et symbolise le second pulse “pulse 1” (P1) sortant de l’animal. Les ondes sonores qui au niveau du crâne ne vont pas vers le junk sont renvoyées vers le *museau du singe*. Elles subissent donc un aller-retour pour ensuite emprunter le trajet précédent. Ceci symbolise le troisième pulse “pulse 2” (P2) et est représenté par le trajet mauve.

P0, P1 et P2 sont émis l’un après l’autre à des intervalles de temps si réduits que l’oreille humaine n’entend qu’un seul évènement là où il n’y en a en fait 3 (dans cet exemple).

L’algorithme MOVIP du LSIS est un modèle original dérivé de la méthode BIVIP présentée à la conférence de Portland sur les mammifères marins [1] qui mesure les intervalles de temps entre ces pulses. Or ces intervalles dépendent de la longueur du spermaceti du cachalot. MOVIP mesure ainsi la taille de la tête, cette mesure est alors transformée en longueur totale de l’animal par la formule de Growcott [18] :

$$Taille = 1.2581 * IPI + 5.736$$

Voici une figure en exemple qui montre de manière claire les influences de ces différents trajets sur la structure d’un clic. Les différents pulses sont ici bien représentés (l’intensité est en ordonnée).

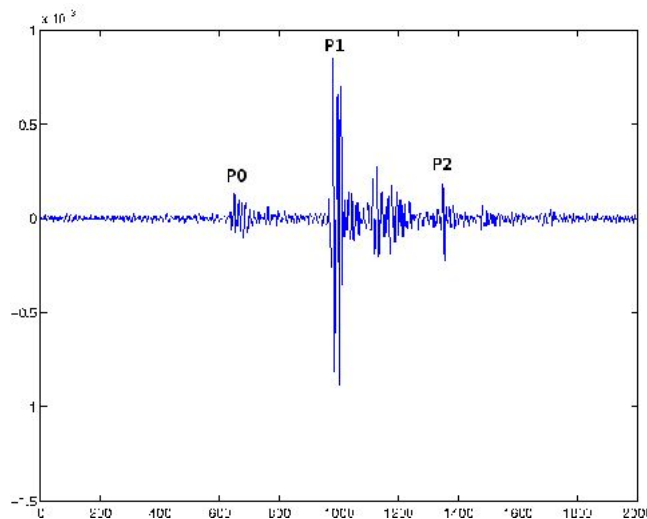


FIGURE 3.4 – Structure d’un clic réel multipulsé.

Il y a donc comme il est expliqué dans l’exemple le P0 (trajet jaune), le P1 (trajet rouge) et le P2 (trajet mauve) espacés du même intervalle reflétant la longueur de la tête. Ainsi la distance de P0 à P1 équivaut à celle de P1 à P2.

C’est donc cette structure qui est recherchée par MOVIP pour ensuite déterminer l’intervalle entre chaque pulse. Nous obtenons ainsi de tels résultats :

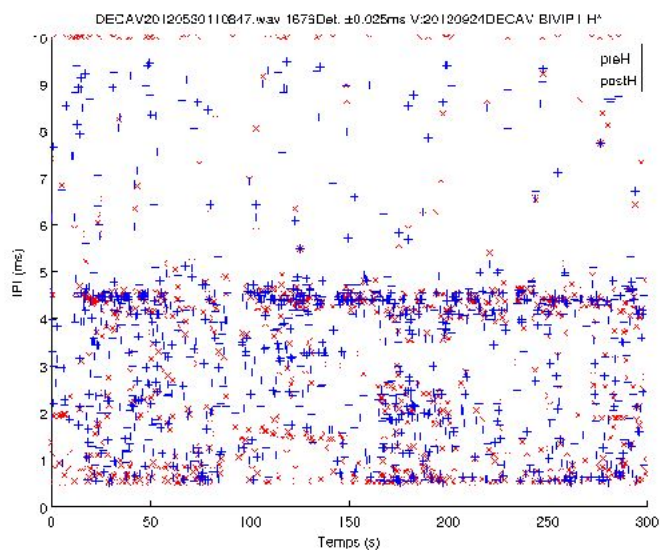


FIGURE 3.5 – Exemple de la sortie PNPC du 30 mai 2012 : Voici les mesures temporellement représentées produites par MOVIP des intervalles de temps entre pulses sur un signal de cachalot enregistré pendant 5 minutes dans le canyon des Stoechades à 11h08.

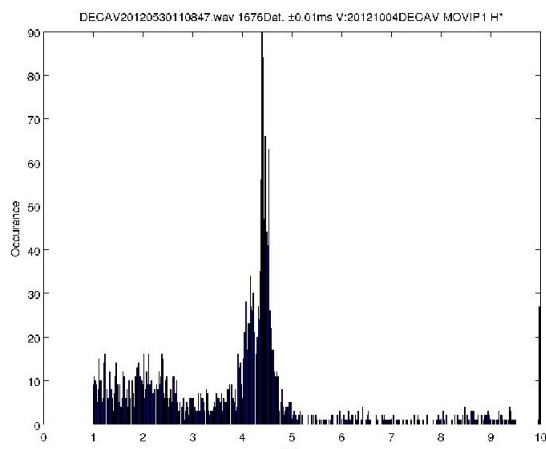


FIGURE 3.6 – Exemple de la sortie PNPC du 30 mai 2012 : Voici les mesures statistiques produites par MOVIP des intervalles de temps entre pulses sur un signal de cachalot enregistré pendant 5 minutes dans le canyon des Stoechades à 11h08.

3.3 Résultats

3.3.1 Détections et Tailles

La figure 3.7 nous montre les résultats obtenus, en terme de détections à la fois acoustiques et visuelles, pour chaque sortie en mer.

Il est à noter que pour deux sorties : celle du 2012/08/02 et du 2012/10/06 un signal additionnel multipulsé (de deux pulses) est présent, mais mis à part cela il ne présente pas les caractéristiques d'un clic normal c'est à dire que l'intervalle d'apparition est trop régulier et le contenu fréquentiel est très différent de ce que l'on s'attend à avoir. Nous attribuons ce signal à un pinger utilisé pour sonder les fonds marins et actif pendant l'enregistrement. Ici nous avons utilisé les acquisitions faites avec le Parc National et l'association Regard du Vivant afin de mieux rendre compte de la population présente au large de Toulon et de Hyères. Chacun de ces organismes possède son propre protocole, le PNPC a un transect type à effectuer alors que Regard du Vivant choisi un protocole opportuniste donc à transect aléatoire.

Si nous résumons quelques points clefs nous obtenons le tableau suivant :

Nombre de sorties au 09/10/2012	26
Nombre de sorties avec vue de cachalot(s)	5
Nombre de sorties avec écoute de cachalot(s)	14
Nombre de sorties avec une mesure automatique de taille	10
Nombre d'enregistrements avec cachalot(s)	77
Nombre d'enregistrements permettant la mesure automatique	27

Il montre l'importance de l'écoute pendant les prospections, car en plus de permettre un dénombrement plus juste de la population de ces mammifères marins (l'écoute est plus efficace que la recherche visuelle), il est très souvent possible d'en connaître la taille.

Tout ces résultats donnent une répartition des tailles de cet ordre :

Date	Equipe	Vus	Entendus	Délais(±0,01ms)	Taille	horaire	Lieu
2011/05/06	PNPC	0	2	4,88	11,88	11h57	Tête du canyon des stoehades
2011/05/19	PNPC	0	1	5,66	12,86	10h49	4 km au Sud de Port-Cros
2011/06/07	PNPC	0	0	-	-	-	4 km au Sud de Port-Cros
2011/07/12	PNPC	0	0	-	-	-	3 km au Sud-Est du Levant
2011/07/28	PNPC	0	0	-	-	-	Tête du canyon des stoehades
2011/08/02	PNPC	1	1	4,54	11,45	9h45	8 km au Sud-Est du Levant
2011/08/31	PNPC	0	1	5,38	12,50	10h52	7,5 km au Sud de Porquerolles
2011/09/16	PNPC	0	0	-	-	-	2 km au Sud de Porquerolles
2012/01/26	PNPC	0	2	4,35;4,55	11,21 et 11,46	10h47	9 km au Sud de Porquerolles
2012/03/16	PNPC	0	0	-	-	-	8 km au Sud-Est du Levant
2012/03/26	PNPC	0	0	-	-	-	7,5 km au Sud e Porquerolles
2012/05/04	PNPC	0	1	-	-	-	15 km Sud-Ouest de Porquerolles
2012/05/30	PNPC	1	2	4,40;4,45	11,27;11,33	10h53;11h27	Canyon des stoehades
2012/06/06	PNPC	0	1	-	-	-	3 km à l'Est du Levant
2012/06/07	PNPC	0	0	-	-	-	A l'Est de Port-Cros
2012/06/15	PNPC	0	0	-	-	-	2 km au Sud de Porquerolles
2012/06/28	PNPC	0	0	-	-	-	Canyon des stoehades
2012/07/10	RdV	1	2	4,86	11,85	9h52	Large Cap sicié
2012/07/23	PNPC	0	0	-	-	-	10 km de Porquerolles
2012/08/02	RdV	0	2	4,90;4,78	11,90;11,74	10h16	8km au Sud-Est du Levant
2012/08/23	PNPC	0	1	-	-	-	9 km de Porquerolles
2012/09/09	RdV	0	0	-	-	-	1 km au Sud de Port-Cros
2012/09/16	RdV	0	0	-	-	-	Large du Cap Sicié
2012/09/17	RdV	1	3	4,6;4,66	11,52;11,60	14h04 et 14h09	Sud Cassis - Cap d'aigle
2012/09/23	RdV	0	1	5,72	12,93	13h58	Sud Cassis - Cap d'aigle
2012/10/06	RdV	1	2	4,44;5,62	11,32 ; n spat12,80	17h23 et 17h56	Large Cap sicié

FIGURE 3.7 – Ce tableau résume les résultats obtenus pour chaque sortie en mer. Pour plus d'information se reporter à la page web DECAV donnée précédemment. La valeur avec une astérisque à été trouvée par analyse manuelle. Les différences des tailles sont significatives.

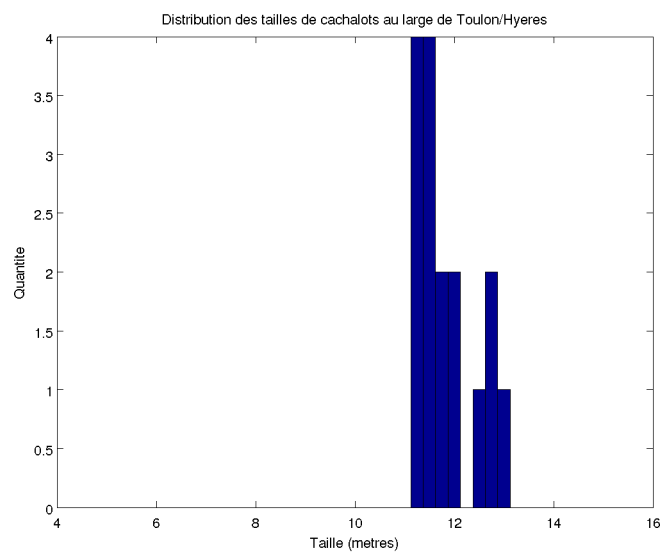


FIGURE 3.8 – Distribution des tailles de cachalots présents au large de Toulon et de Hyères.

On remarque dans le graphique qu'il y a plus d'individus aux alentours de 12 mètres que de 13 mètres. Si nous prenons en compte le fait que les cachalots présente un dimorphisme sexuel c'est à dire que les mâles sont plus grands que les femelles nous pouvons attribuer le premier mode (celui des 12 mètres) aux femelles et le mode des 13 mètres aux mâles.

3.3.2 Distribution géographique des détections de cachalots

La carte de la figure 3.9 nous indique la répartition géographique des détections visuelles et acoustiques faites lors des sorties sur le terrain.

Nous présentons maintenant, la carte de l'effort de recherche des cachalots (cf figure 3.10). Cette carte a été établie grâce au tableau de la figure 3.7. Dessus, on voit apparaître des rectangles de différentes couleurs correspondant à la probabilité de détecter des cachalots (d'un point de vue acoustique) dans une zone prédéfinie. Le calcul de cette probabilité, propre à chaque zone, est :

$$p(x, y) = \frac{\sum^+(x, y)}{\sum[\text{sortie}^+(x, y) + \text{sortie}^0(x, y)]} \quad (3.1)$$

Sur cette carte, nous remarquons tout d'abord deux zones où la probabilité est supérieure à 0.75. Cependant, il existe une différence entre ces deux zones. En effet, la zone (1,2) ne comprend qu'une seule détection est à une probabilité de 1. L'autre zone (2,1) a une probabilité de 0.75 avec 6 détections positives. Sur cette même carte, on voit apparaître une autre zone (celle du canyon des stoechades) où la probabilité est comprise entre 0.5 et 0.75. Cette carte n'est qu'un début. En effet, pour pouvoir dire que l'on considère une zone comme étant une zone de forte probabilité de présence de cachalots, il nous faudrait avoir beaucoup plus de mesures et cela ne peut se faire que sur le long terme. La zone du canyon des stoechades mérite d'être exploitée afin de savoir si c'est une zone de forte probabilité de présence de cachalots ou pas.

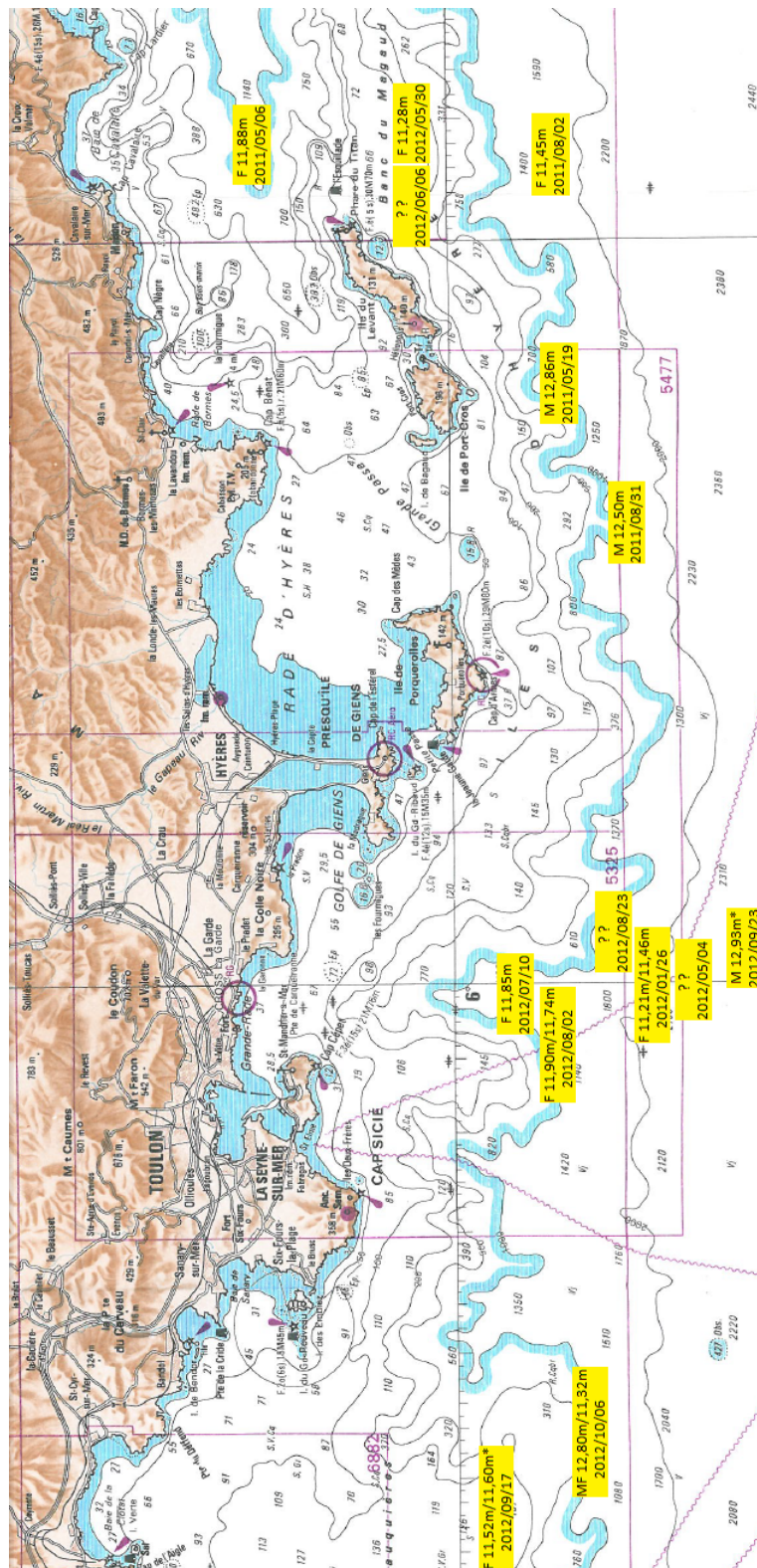


FIGURE 3.9 – Distribution spatiale des cachalots au cours des 16 premières sorties. Chaque cadre jaune fait figurer la position de l'écoute, le jour de l'enregistrement, le sexe de l'animal ainsi que sa taille. Les cadres jaunes avec une astérisque représentent une position qui est en dehors de l'image.

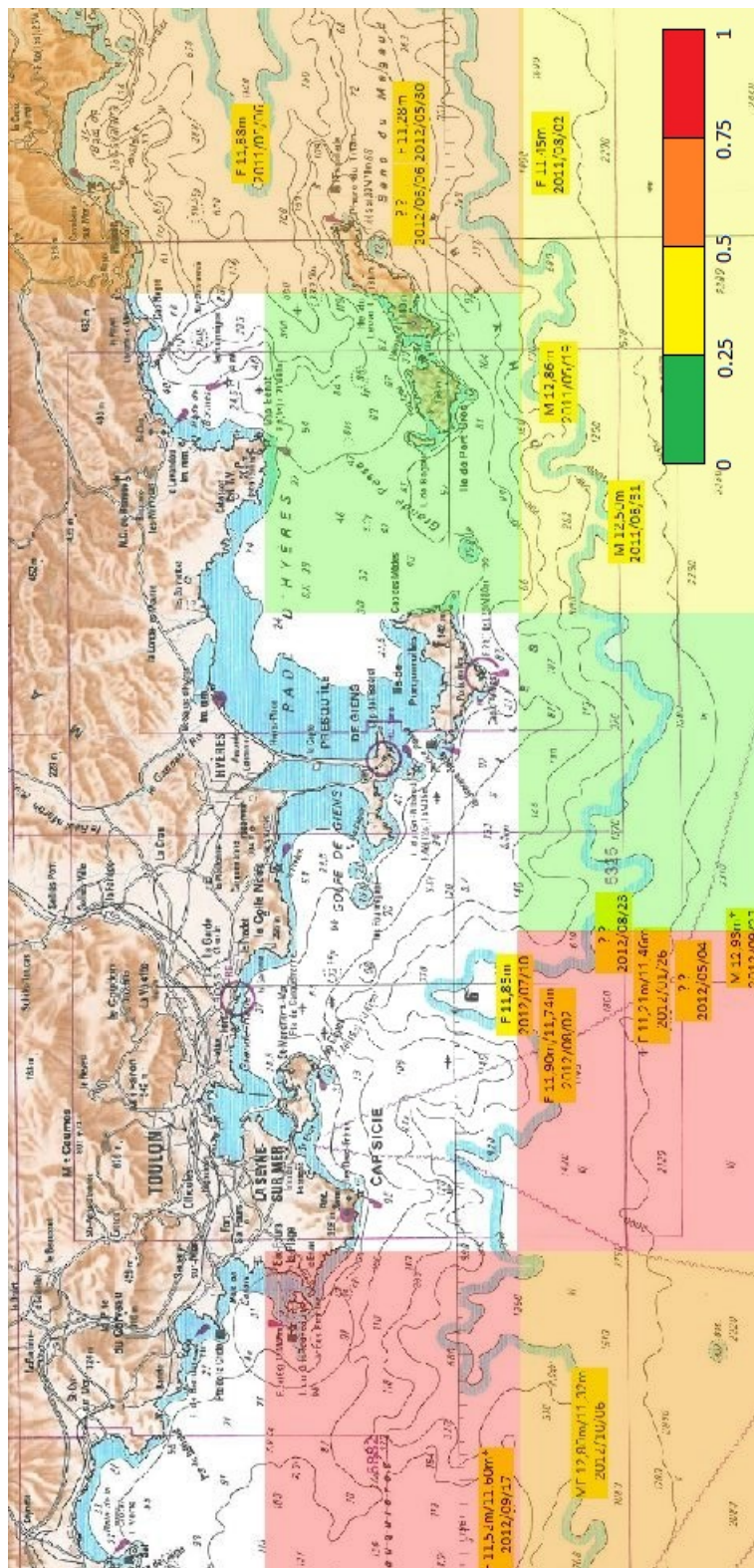


FIGURE 3.10 – Carte de l’effort de recherche de cachalots par zones prédéfinies. En vert, les zones où il n’y a pas eu ou très peu de détection - En jaune, les zones de probabilité de détection sont comprises entre 0.25 et 0.5 - En orange, elles sont comprises entre 0.5 et 0.75 - En rouge, les zones ont une probabilité supérieure ou égale à 0.75 - on nomme de les zone de la manière suivante (x,y) - De bas en haut et de gauche à droite : $p(1,1) = 0.5$, $p(1,2) = 1$; $p(2,1) = 0.75$; $p(3,1) = 0$; $p(4,1) = 0.4$, $p(4,2) = 0$; $p(5,1) = 0.33$, $p(5,2) = 0.66$, $p(5,3) = 0.5$

3.4 Discussion, recommandations

Nous donnons les résultats de la distribution temporelle du Cap Sicié aux îles d'Or de l'abondance en cachalots.

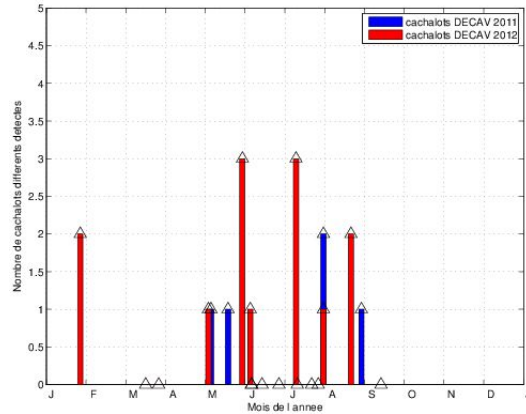


FIGURE 3.11 – Variations superposées de l'abondance en cachalots détectés lors des sorties en 2011 et en 2012. En bleu l'année 2011 et en rouge l'année 2012.

Comparaison avec REPCET La fréquence relativement élevée des sorties réalisées aux mois de mai, juin, juillet et août augmente considérablement la probabilité que les mesures acoustiques rendent compte de la valeur réelle de l'abondance en cachalots. En revanche, pour les mois d'octobre, novembre, décembre, janvier, février, mars et avril, il est *a priori* difficile d'évaluer la représentativité des échantillonnages acoustiques. Cette incertitude est contournée dans ce rapport en comparant les résultats DECAV 2011 et 2012 aux distributions mesurées en 2011 par le système REPCET.

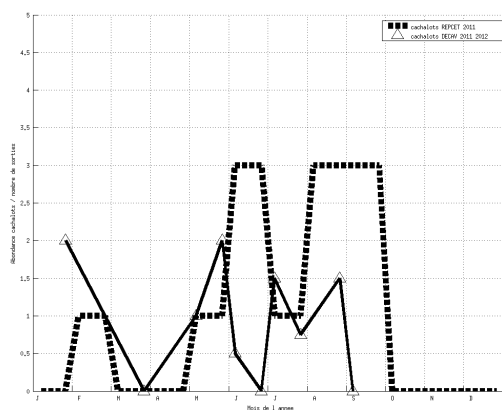


FIGURE 3.12 – Distributions temporelles des observations de rorquals et cachalots réalisés par le système REPCET en 2011 [24].

Comme le souligne Pascal Mayol dans le Bilan des observations REPCET 2011 [24], “La courbe de distribution des cachalots, pour sa part, ne présente pas d’anomalie caractérisée mais est basée sur un nombre très faible de données (11 observations), ne permettant pas d’interprétation.”

A titre de comparaison, en 2011, l’utilisation de l’outil acoustique embarqué sur les embarcations du PNPC a abouti à la détection acoustique de 5 animaux. Pour le moment l’avantage de REPCET sur le système DECAV est visible mais avec une hausse des prospections avec le parc ou même l’installation d’un système de localisation des animaux, la tendance devrait s’inverser.

La comparaison des résultats de REPCET 2011 et DECAV 2011/2012 révèle que :

- Les deux systèmes (REPCET ET DECAV) observent la présence marquée de cachalots de mai à septembre et une absence en mars et en Avril.

- La courbe REPCET témoigne d’une absence lors des mois d’octobre, novembre et décembre.

Ces observations ne peuvent qu’encourager le PNPC à poursuivre les sorties terrains lors de ces trois derniers mois de l’année pour confirmer, infirmer ou nuancer des observations similaires. Car en effet, si l’absence de cachalots est confirmée en hiver, c’est une donnée essentielle de l’écologie de l’espèce. Donnée qui pourrait par exemple être mise à profit en collaboration avec la marine nationale (chasseurs de mines et plongeurs démineurs) pour neutraliser les mines de la seconde guerre mondiale tout en limitant l’impact possible sur les cachalots. Le déploiement par le PNPC d’une embarcation rapide et légère équipée du matériel LSIS avec une fréquence relativement régulière entre mai 2011 et août 2012, a abouti à l’obtention de résultats équivalents à ceux obtenus en 2011 par les systèmes REPCET opérationnels équipant le CROSSMED, 3 navires de La Méridionale, 1 navire de la SNCM, 1 bateau privé, 1 navire de France Télécom Marine et 1 navire de Costa Croisière. A cela vient s’ajouter que dans le cadre de la convention LSIS/PNPC, l’analyse acoustique permet non seulement d’en savoir plus sur la présence/absence de cachalot car indépendant du cycle de plongé de l’animal (REPCET est uniquement visuel) mais également sur la taille (et dans certain cas le sexe) d’animaux en plongée.

Les mesures acoustiques d’abondance en cachalots ont été réalisées à des époques différentes de l’année. Donc dans les mois à venir, le PNPC disposera d’un recul de 2 ans sur la variation d’abondance. Il sera alors bientôt possible de discuter de l’évolution d’année en année.

Les mesures sont réalisées selon les moyens humains du PNPC, du LSIS et surtout de la météo. En conséquence, les mesures sont irrégulières. Nos interprétations doivent donc être considérées avec précaution car nos échantillons sont faibles. Nous ignorons si ces derniers sont représentatifs de la variation réelle d’abondance. Par exemple, nous n’avons aucune idée de l’abondance acoustique lors des mois d’octobre, novembre, décembre et janvier (soit 25 % du cycle biologique annuel de l’espèce). Ceci est fortement préjudiciable à une réflexion sur l’écologie de l’espèce et donc à sa protection.

Les données actuelles encouragent les conjectures suivantes :

- L’abondance en hiver est inconnue car non mesurée. Cette période est ex-

clue de la réflexion.

–Lors d’une sortie PNPC/LSIS, il y a statistiquement plus d’une chance sur deux) qu’un cachalot soit détecté acoustiquement (donc mesuré).

–Les cachalots sont présents toute l’année au large des îles d’Hyères et dans le canyon des Stoechades.

–Au cours de l’année, des abondances positives régulières sont observées à partir du mois de mai jusqu’à fin août. L’espèce fréquente régulièrement les sites d’écoute essentiellement dans ce laps de temps. Février, mars et avril sont des mois où l’abondance mesurée est nulle. L’espèce est alors moins voire pas présente.

–Au sein de la période de présence et d’activité maximales (mois de mai jusqu’à fin août).

Nous pouvons aussi considérer les paramètres environnementaux susceptibles de varier pendant cette période tels que :

–les activités touristiques de loisirs (jet ski, plaisance)

–les activités de tourisme “ vert ” (whale watching) et pas seulement

–le pétardage de mine historique dans la baie d’Hyères

–les opérations militaires dans la rade de Toulon et d’Hyères impliquant l’emploi de sonars actifs.

Chapitre 4

Analyse de perturbation acoustiques anthropiques : application aux pétardages

4.1 Généralités sur les pétardages



FIGURE 4.1 – Le bâtiment de surface, base des plongeurs démineurs (BBPD) “Archéron” en opération de pétardage. Source : Marine nationale.

La Marine Nationale assure une mission d'utilité publique, militaire et environnementale en neutralisant de vieux explosifs (ex : mines historiques de la deuxième guerre mondiale) pouvant constituer une menace pour les activités humaines telles que la pêche professionnelle, la plongée sous-marine, la baig-

nade. Chaque intervention s'articule en trois temps :

1-Les plongeurs démineurs remontent la mine en subsurface via un ballon gonflé d'air (" la vache ").

2-Ainsi remontée, la mine peut être tractée par un zodiac jusqu'au site de pétardage.

3-Un pain de plastic de 500 grammes à 1 kg est posé en contact direct de la mine. Son explosion déclenchée entraîne l'explosion de la charge à neutraliser.

Remarque : Lorsque le risque d'explosion durant l'intervention est trop élevé, c'est un petit sous-marin (le PAP, " Poisson Autopropulsé ") téléguidé depuis un chasseur de mine qui vient déposer à proximité (et non pas au contact direct) de la mine une charge de 80kg.

La charge de la mine varie, en fonction du modèle, de 100 kg à 900 kg d'explosifs (divers types d'explosifs utilisés selon les pays, souvent du trinitrotoluène, "TNT", ou du tolite d'aluminium).

4.2 Matériel et méthode

La mesure est effectuée à bord d'un zodiac du PNPC, placé à 3 000m du lieu de pétardage, distance minimale autorisée pour une embarcation lors de ce genre d'opération (distance désormais de 3 km). La profondeur sur cette zone est de 45 m. Plusieurs bateaux sont présents sur site, moteur allumé. Ce jour là, deux tentatives de pétardages successives ont lieu. La première échoue, seule l'amorce explose. La seconde permet l'explosion de la mine.

4.3 Analyse des mesures acoustiques

4.3.1 Representation temps - fréquence

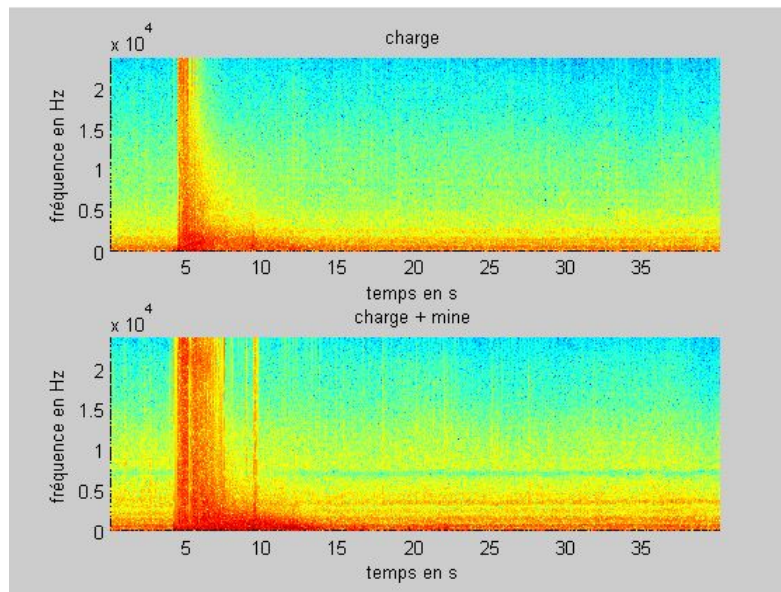


FIGURE 4.2 – Représentation temps/fréquence des signaux mesurés. En haut : seule l’amorce a explosé. En bas : L’amorce et la mine ont explosés.

Cette représentation nous donne un aperçu du signal dans les domaines temporel et fréquentiel. Avant et après l’explosion on observe le bruit de mer (basse fréquence). Pendant l’explosion, on retrouve l’aspect hautement énergétique et large bande de l’explosion. Notre fréquence d’échantillonnage limite notre analyse à 24 khz. Nous notons que le plus haut niveau d’énergie (couleur rouge foncé) est véhiculé par les basses fréquences voyageant sur de très longues distances (probablement plusieurs de dizaines de km). Toutefois une quantité importante d’énergie est véhiculée par les hautes fréquences. D’autant que notre visibilité à haute fréquence est fortement contrainte par la sensibilité en réception de l’hydrophone, le taux d’échantillonnage et la saturation du signal. Même si les hautes fréquences s’atténuent rapidement au cours de la propagation, elles sont susceptibles de causer des dommages sur les organismes vivants directement exposés sur le site du pétardage (compte tenu des hauts niveaux d’énergie mis en jeu).

Dans le cas charge + mine, on observe un écho très énergétique 6 s après l’explosion. Ce qui rend compte une fois de plus du caractère encaissé et résonnant du site de pétardage.

4.3.2 Dans le domaine temporel

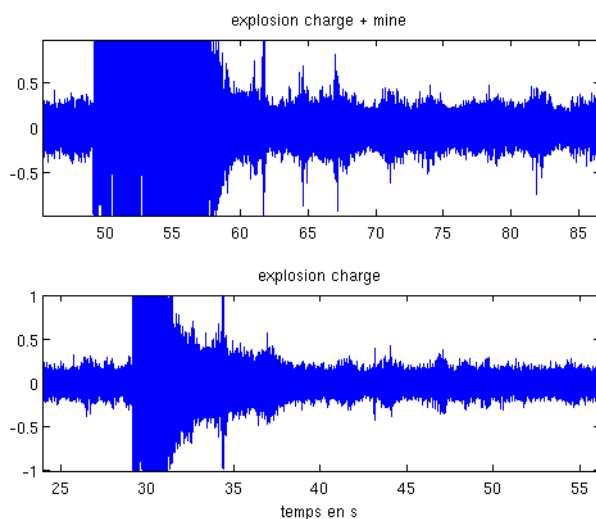


FIGURE 4.3 – Représentation temporelle des signaux mesurés.

La figure 4.3 représente les signaux acquis à 1 000 m du lieu de l’explosion. En haut, seule la charge explose. En bas, la charge puis la mine explosent. On distingue l’explosion principale ainsi que des répliques pouvant provenir de réflexions multiples sur le relief environnant ou de phénomènes de conversion d’onde. On obtient plusieurs échos séparés régulièrement d’environ 2,7 s, ce qui correspond à une variation de chemin acoustique de 4 000 m. L’explosion entraîne une brusque variation de la pression du milieu sur une durée d’environ 10 s dans le premier cas et de 20 s dans le second.

Il faut noter que le signal est vite saturé. Les hydrophones utilisés sont très sensibles et conçus pour mesurer des signaux acoustiques (faibles variations de pression autour de la valeur d’équilibre). Ils sont donc peu adaptés aux mesures d’onde de choc (variations de pression de grande amplitude) et il nous était difficile de pré-régler notre dispositif. Par conséquent nous perdons une partie non négligeable de la dynamique du signal. Il est certain que les niveaux d’énergie au moment de l’explosion sont sous-évalués. Une solution consiste à utiliser une technique de calibrage automatiquement adaptatif. Mais les échelles de temps sont très restreintes (< 1 s) par rapport au temps d’exécution informatique. L’autre solution réside dans l’emploi de matériel spécifique à ce type de mesures.

De plus des modulations apparaissent. Elles traduisent la présence de bateaux à moteurs effectivement présents sur zone ce jour là. Nous n’avons pas effectué de filtrage pour ne pas biaiser l’analyse.

4.3.3 Dans le domaine fréquentiel

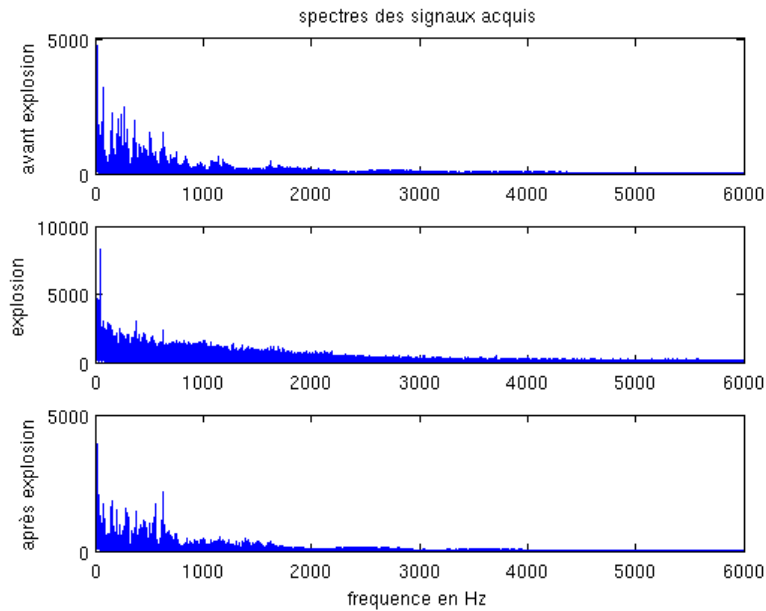


FIGURE 4.4 – Représentation fréquentielle des signaux mesurés (module de fft) lors de l’explosion charge + mine. De haut en bas : bruit de mer avant explosion, bruit de mer + explosion, bruit de mer après explosion.

Avant l’explosion, On trouve un spectre composé du bruit de mer, provenant de l’activité biologique et des phénomènes physiques survenant dans la colonne d’eau. Son contenu fréquentiel est plutôt basse fréquence et présente une rapide décroissance vers les plus hautes fréquences. Le spectre contient aussi plusieurs pics à partir de 500 hz provenant probablement de bruits de tournante type moteurs de bateaux. Les fréquences des sons rayonnés par les hélices sont fonction du régime et du nombre de pales et impactent le spectre entre 0 et 5 khz.

Lors de l’explosion, toutes les composantes fréquentielles voient leur énergie augmenter de manière significative. En effet, l’explosion a généré un signal large bande provoquant une certaine homogénéisation du spectre. Une analyse de la proportion d’énergie véhiculée par bandes de fréquence montre que 58 % de l’énergie est transmise entre 0 et 5 khz et 42 % entre 5 khz et 24 khz (pour $F_e = 48$ khz).

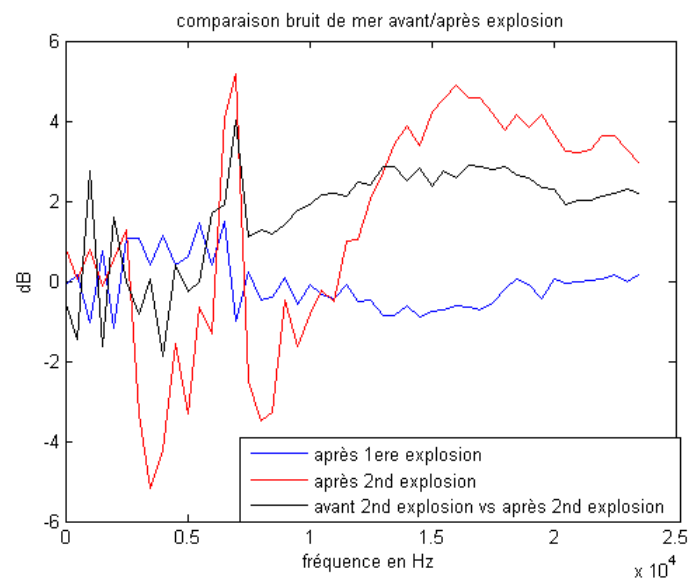


FIGURE 4.5 – Comparaison des niveaux d'énergie par bandes de fréquences de 500 hz entre le bruit de mer avant et après la première explosion + comparaison entre le bruit de mer avant la première explosion et le bruit de mer après la deuxième explosion. Niveau avant explosion par rapport à niveau après explosion en dB. Le calcul est effectué sur des portions de 47,5 s.

Après la déflagration, on retrouve un spectre sensiblement similaire, en terme de forme et d'intensité, à la phase précédant l'explosion. Une analyse plus fine est traduite par la figure 4.5 qui représente la comparaison par bandes de fréquences de 500 Hz entre :

- cas 1 : bruit de mer avant première explosion et bruit de mer après première explosion
- cas 2 : bruit de mer avant première explosion et bruit de mer après seconde explosion
- cas 3 : bruit de mer avant seconde explosion et bruit de mer après seconde explosion.

Jusqu'à 5 khz, le rapport des energies oscille par de brutales variations entre -1 et +1 dB dans le premier cas, -5 et +2 dB dans le second cas, -2 et +2 dB dans le dernier cas. Cela peut etre mis en relation avec la présence des bateaux : les changements de régime moteur et les déplacements entre les phases avant et après explosion peuvent engendrer de telle fluctuations. L'augmentation de l'amplitude des variations entre le cas 1 et le cas 2 montre que les mouvements des bateaux sont plus importants après explosion. A 7 khz un dernier pic important (entre +1 et + 4 dB) apparaît dans les trois cas. Enfin, le rapport semble adopter un régime plus stable. Dans le premier cas on observe ce rapport autour de -1 dB. Dans les cas 2 et 3 on observe une augmentation significative du rapport (entre + 2 et +4 dB). Ces résultats montrent donc une baisse d'énergie après la seconde explosion pour les fréquences comprises entre 5 khz et 24 khz. Si l'énergie emise sur cette bande de fréquence est associée à l'activité biologique, ces résultats pourraient révéler l'aspect létal des pétardages.

4.3.4 Quantification relative du niveau sonore engendré par l'explosion

Nous avons choisi une analyse de niveau d'énergie relative plutôt qu'absolue. En effet notre niveau de référence est celui généré par la colonne d'eau en l'état précédant l'explosion : multiples bateaux sur zone moteurs allumés. La méthode relative nous permet de ne pas prendre en compte l'énergie émise par ces bruits parasites et quantifie le changement d'état du milieu de propagation.

Nous représentons ici le niveau d'énergie E_{dB} au cours du temps, relativement au niveau de référence extrait avant l'explosion E_{ref} . L'énergie est calculée par par fenêtre de 150 ms.

$$E_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{E}{E_{ref}} \right) \quad (4.1)$$

où l'énergie du signal $x(t)$ est calculée dans le domaine temporel par :

$$E = \int |x(t)|^2 dt \quad (4.2)$$

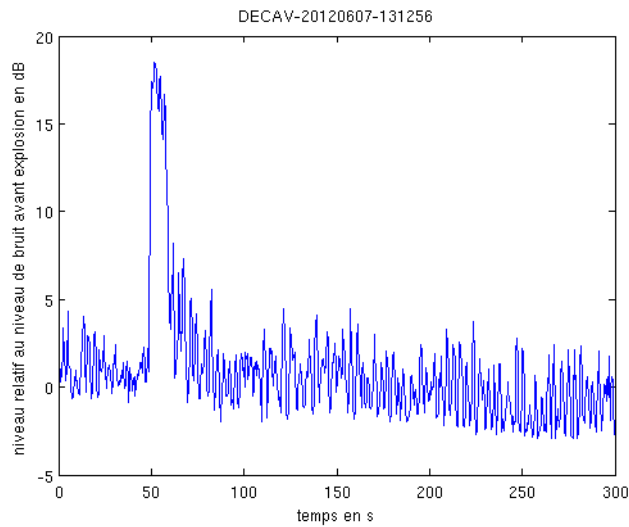


FIGURE 4.6 – Niveau d'énergie relatif au niveau de bruit précédent l'explosion (charge + mine).

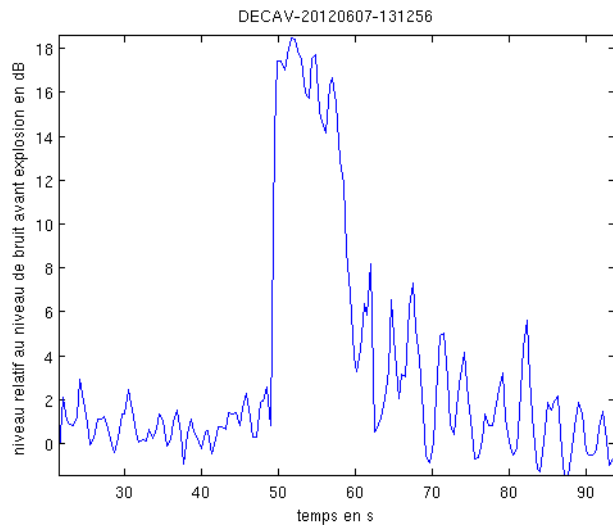


FIGURE 4.7 – Niveau d'énergie relatif au niveau de bruit précédent l'explosion (charge + mine). Zoom sur l'instant de l'explosion.

Avant l'explosion, le niveau oscille entre -2 et +4 dB autour du niveau de référence. L'explosion provoque une hausse quasi instantanée de 18 dB. Cela est considérable, le niveau d'énergie est au moins 63 fois supérieur à la normale à 1 000 m du lieu de l'explosion (valeur minimale due à la saturation des hydrophones). On note que les explosions principales et les multiples échos successifs maintiennent le niveau d'énergie supérieur à la normale ($> +5$ dB)

durant près de 30 s.

Par la suite le niveau semble plus bas qu'avant l'explosion. Mais cette diminution est à interpréter avec précaution et ne peut pas être directement reliée à une baisse d'activité biologique. Les bateaux sur zone évoluent et peuvent être responsables de la variation d'énergie ainsi observée.

4.4 Discussion et perspectives

L'endroit choisi par la Marine Nationale pour neutraliser les différentes charges explosives présente plusieurs avantages et inconvénients :

Avantages	Inconvénients
L'onde de choc et l'énergie libérées sont rapidement stoppées et réfléchies par -à l'Ouest, le tombolo de la presqu'île de Giens -au Nord et Nord-Est par la côte -au Sud-Ouest par l'île de Porquerolles -au Sud-Est par les îles du Levant et Port-Cros -faible profondeur (<100 m) donc absence de guide d'onde.	-Localisation très proche au Sud et à l'Est de 2 tombants (ex : tête du canyon des Stoechades à l'Est) importants vers de grandes profondeurs. -Réflexion des ondes sonores percutant les masses rocheuses proches et faisant de la rade une caisse de "résonance".

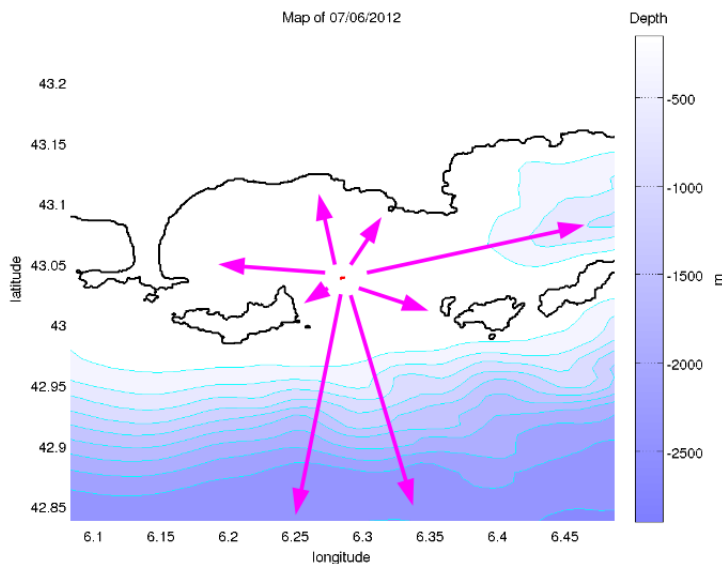


FIGURE 4.8 – Schématisation de la propagation des ondes sonores lors d'un pétardage.

Pour les mêmes raisons qui font de la rade d'Hyères une mer calme (isolée de la houle du large), le point de pétardage est relativement bien cerclé par des masses rocheuses. Celles-ci remplissent le rôle d'écran acoustique. De plus, la faible profondeur du site (moins de 100 m) empêche l'existence de canaux de propagation de type guide d'onde (SOFAR) dans lesquels l'énergie est "piégée" et peut se propager sur de très grandes distances. L'onde engendrée par l'explosion subit une atténuation classique par divergence géométrique et atténuation fréquentielle.

Cependant,

-les ondes sonores arrivant en contact avec les masses rocheuses que constituent le littoral et les îles d'Hyères sont en grande partie réfléchies. La rade d'Hyères devient alors une "caisse de résonance" piégeant les ondes sonores : les cétacés se trouvant alors dans cette rade subissent une nuisance sonore de forte amplitude mais également pendant un intervalle de temps très grand (plusieurs dizaines de secondes) dus aux phénomènes d'échos.

-L'utilisation dans le temps et l'espace de la Rade d'Hyères par les espèces de dauphins (ex : Grand dauphin) est encore très mal connue.

Le pétardage entraîne des impacts sur la biomasse, comme :

-une multiplication du niveau d'énergie sonore par un facteur supérieur à 63.

-cette élévation du niveau d'énergie sonore est instantanée. Un tel phénomène physique (brutal et hautement énergétique) affecte l'ensemble des êtres vivants dotés d'organes sensibles aux variations de pressions (compression/décompression) : cétacés (organes de l'écholocation et de l'ouïe), poissons (ligne palléale et vessie natatoire) mais également algues, plantes (posidonie) puisque pourvues de vacuoles. L'explosion entraîne la mort d'une partie de ces êtres vivants et un important stress de tous les individus. Rappelons que dans le cadre d'un pétardage, " La quantité de poisson remontant à la surface [...] est minime par rapport à celle qui reste au fond de l'eau.". La présence ou absence de poissons ou cétacés flottant inertes en surface à proximité du lieu de l'explosion ne rend pas compte des phénomènes de mortalités et de lésions cérébrales plus ou moins graves qui ont pu avoir lieu dans les différents horizons marins séparant la surface du fond à 47m. Il existe très peu de données sur les effets des explosions sous marines sur les végétaux aquatiques. Cependant Ludwig (1977) utilisait les explosifs comme "herbicide" pour éliminer la Zostère marine et autres types d'algues. La disparition des espèces d'algues et la modification de leur activité photosynthétique suite à une explosion, notamment répétée dans le temps, a été étudiée et confirmée plus tard par Smith (1996). L'ensemble des études publiées sur le sujet confirment que les invertébrés sont très sensibles aux variations de pressions qu'entraînent les explosions sous-marines. Parmi les groupes d'espèces concernées, les anémones, les coraux, les néréides, les vers marins, les mollusques gastéropodes (escargots), les mollusques bivalves (huîtres, moules), les crustacés isopodes, décapodes (crevettes, crabes ...). Chez les mammifères marins, ce sont les organes contenant des gaz qui sont systématiquement affectés par la détonation (Cameron, Short et Wakeley, 1943 ; Clark et Ward, 1943). Hill (1978) et Ketten (1995) fournissent la plus récente littérature sur le sujet. La méthode la plus simple pour protéger les mammifères marins des explosions sous marines consiste à éviter ce genre d'opérations pendant les périodes de présence. Dans la rade de Hyères, les travaux conjoints du LSIS/PNPC rendent compte de la variation démographique en cétacés depuis plus d'un an.

Ces résultats démontrent très clairement que la programmation d'un pétardage au mois de juin dans l'archipel des îles d'Hyères à moins de 20 kilomètres du canyon des Stoechades est très peu pertinente d'un point de vue conservation.

Conclusion : La littérature abondante fournie par différentes équipes à différents endroits du globe, appuient les interprétations suivantes :

- Les silences anormalement profonds et la tendance à une diminution du niveau sonore de l'écosystème consécutifs à l'explosion correspondent à une diminution et dans une moindre proportion à la disparition de l'activité biologique : mortalité immédiate ou stress des invertébrés et vertébrés.

- Pour une gestion optimale d'un point de vue sécurité du trafic maritime et conservation de la biodiversité remarquable du Sanctuaire PELAGOS (espace de protection international comprenant un domaine de haute mer pour les mammifères marins) et du Parc National de Port-Cros, les opérations de pétardage de ce type devraient être programmées en concertation entre la Marine Nationale et le Parc National de Port-Cros.

- La mesure bioacoustique réalisée par le laboratoire LSIS lors du pétardage du 07 juin 2012 ne permet pas de rendre compte des conséquences plus estompées dans le temps de l'explosion : conséquences notamment sur les végétaux marins (bases du réseau trophique et habitat des niveaux trophiques supérieurs).

4.4.1 Impact du son sur les cétacés

Il y a plusieurs sources de bruit qui peuvent impacter les cétacés et leur environnement : le trafic maritime, les matériels sonores utilisés pour les pêcheries (sonars, pingons (Acoustic Deterrent Devices et Acoustic harassment Devices), éoliennes et hydroliennes, prospections pétrolières et géophysiques (sonars, air-guns), plateformes pétrolières (construction (pile-driving) et exploitation), ports (construction, activités), activités côtières, forage (pile-driving, explosifs) et drainage, activités militaires (sonars, explosifs).

L'impact des sons dépend de 1) l'amplitude (il semble que les sons de faible intensité n'ont, sur certaines espèces, pas d'effet, voire un effet d'attraction), 2) la bande fréquentielle, 3) le type (la forme, la durée) du son (un son bref peut être plus gênant, voire plus nocif qu'un son continu, pour lequel il peut y avoir une notion d'habituation), 4) la distance entre la source et le récepteur (propagation), 5) la présence éventuelle d'autres bruits (masquage), 6) la sensibilité auditive de l'individu (espèce, santé, âge).

En 2012, l'ensemble des paramètres est mesurable, sauf la sensibilité auditive qui n'est connue que pour une dizaine d'espèces d'odontocètes (potentiels évoqués auditifs mesurés sur des individus en bassin). Ceci dit, des observations visuelles ont été réalisées dans le milieu naturel, à proximité de sources sonores et il a été possible d'en déduire des seuils par analyse du comportement. L'observation d'échouages coïncidant avec l'utilisation de matériels bruyants dans une zone est également maintenant une information importante pour caractériser le seuil de tolérance.

Actuellement, on essaie de définir l'impact de ces sons, par des pertes temporaires ou des pertes permanentes, comme cela a été fait pour l'homme. Il y

a eu des expériences faites sur des individus en captivité (lion de mer, phoque, éléphant de mer, dauphin, beluga) montrant que certaines expositions pouvaient engendrer des pertes temporaires ; aucune expérience (en bassin) n'a été publiée sur la perte définitive d'audition chez les cétacés.

Pour le *Tursiops truncatus*, [15] ont déterminé le seuil de perte auditive temporaire pour une émission sonore de quelque ms provenant d'une source sismique à 224 dB re.1 μ Pa. En 1997, Ridgway *et al.* [31] ont évalué ce seuil pour un signal artificiel à bande étroite de 1 s. Le seuil est atteint pour un niveau de 194 dB re.1 μ Pa à 3 KHz, 193 dB re.1 μ Pa à 20 KHz, 192 dB re.1 μ Pa à 75 KHz.

Les sons impactent également d'autres parties de l'anatomie, et pas uniquement le système auditif, voire engendrent des changements de comportement qui peuvent être à l'origine de la mort (comme peut-être des remontées trop rapides de baleines à bec), des changements de communication, des changements d'habitat, des échouages. Yelverton *et al.* [35, 34] expérimentent sur des mammifères terrestres immergés, les effets d'explosions sous-marines. A partir de ces résultats, Richardson [30] propose un modèle permettant d'évaluer le niveau moyen de pression I (Pa.s) à partir duquel les effets deviennent létaux en fonction de la masse M (Kg) de l'animal. Il donne :

mortalité dans 50 % des cas : $\ln(I_{50}) = 5.01 + 0.3857\ln(M)$

mortalité dans 1 % des cas : $\ln(I_1) = 4.55 + 0.3857\ln(M)$

Source	Masque acoustique	Déplacement d'habitat	Trauma physique	Perte auditive	Changement de comportement	Conditionnement de comportement
Bateaux	X	X				
Canons à air	X	X	X	X	x	x
Sonar basses et moyennes fréq			X	X	X	
Forage			X	X	X	X
Autres sonars	X			X	x	X
Drainage		X			x	X
Pêche		X			X	X
Explosions			X	X	x	X
Bateau de loisirs	x				x	X
Avions						x

FIGURE 4.9 – Effets de différents types de sons anthropogéniques sur les cétacés [6].

Bilan :

1. Observer les cétacés avant un exercice bruyant, pour savoir s'ils sont dans

la zone ou pas. Se servir de cette information pour choisir une zone sans cétacé.

2. Observer les cétacés pendant l'exercice pour voir leurs comportements, et éventuellement détecter le premier signe d'une situation délicate qui pourrait s'avérer dangereuse. Il faut que ces observateurs indépendants aient le pouvoir de stopper l'exercice (comme c'est le cas sur des observateurs présents sur certains bateaux de prospection pétrolière et sur certains bateaux de marine militaire).

3. Poursuivre la recherche scientifique (anatomie, comportement, recensement, habitat, impact sur les proies, acoustique sous-marine, traitement du signal, reconnaissance des formes).

4. Minimiser les activités sonores à risque (préférer les simulations informatiques).

5. Demander à ce que toutes les activités bruyantes soient déclarées à la Préfecture Maritime et au Sanctuaire PELAGOS.

6. Eduquer tous les acteurs en mer.

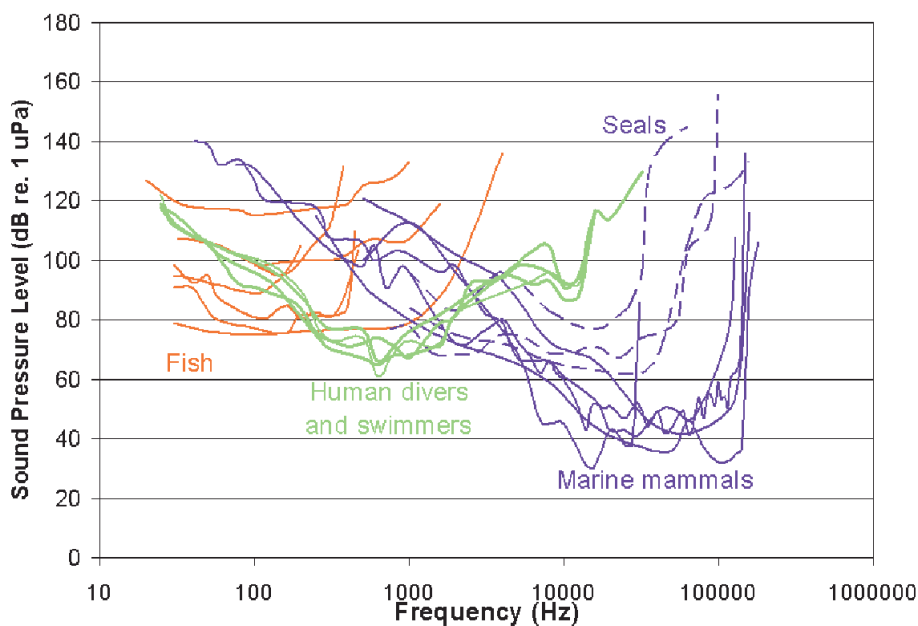


FIGURE 4.10 – Comparaison des sensibilités fréquentielles entre l'Homme, poissons et certaines espèces de mammifères marins [26].

4.4.2 Références théoriques

Equations fondamentales de l'acoustique

L'équation de propagation se déduit par une combinaison de la divergence de l'équation d'Euler et la dérivée temporelle de l'équation de continuité. Elle se présente ici en fonction de la pression, mais la vitesse et le potentiel sont aussi solution de l'équation d'onde.

$$p(r) = A \frac{e^{jkr}}{r}$$

On trouve l'expression d'une onde sphérique dont l'amplitude présente une décroissance typique en $1/r$.

Phénomènes d'atténuation de l'énergie en transmission

Lors de la propagation, l'onde acoustique subit des pertes d'énergie d'origines multiples.

- Les pertes par divergence géométrique : L'onde sphérique, au fil de sa propagation, voit son énergie se répartir sur des surfaces de front d'onde de plus en plus grandes. Pour des raisons de conservation de l'énergie, on observe une décroissance de celle-ci en $1/r^2$ en accord avec le terme $1/r$ obtenu pour la solution de l'équation d'onde en 3D.

- Les pertes par atténuation fréquentielle dues aux interactions entre l'onde et le milieu de propagation. Plusieurs modèles ont abouti à des relations empiriques (Leroy, Thorp, Francois et Garisson) décrivant cet amortissement en fonction des paramètres physico-chimiques du milieu (salinité, température, PH, pression...). Pour la Méditerranée, le modèle le plus adapté semble être celui de Leroy. Il donne la formule du coefficient d'atténuation en fréquence en dB/Km suivante [C. Leroy,1965] :

$$\alpha(f) = 6.10^{-3} f^2 + 0.16 \frac{f_r f^2}{f_r^2 + f^2}$$

Avec $f_r = 16kHz$ déterminé de façon empirique [21].

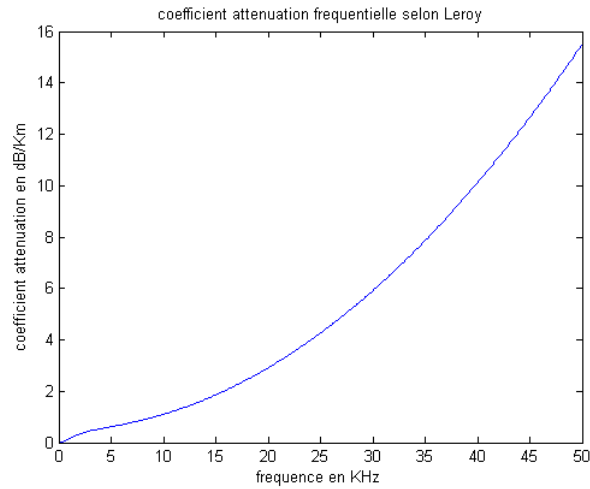


FIGURE 4.11 – Coefficient d’atténuation fréquentiel selon le modèle de Leroy d’après l’expression donnée ci-dessus.

La réunion de ces facteurs de pertes ainsi décrits est appelée niveau TL (Transmission Loss). Il est exprimé en dB et dépend donc de la fréquence.

$$TL = -20 \log \frac{|P(r)|}{|P_0|}$$

$$TL = -20 \log(r) - \alpha(f)r$$

où $|P(r)|$ est le niveau de pression reçue à une distance r de la source et $|P_0|$ est le niveau de pression à 1 m de la source par convention.

Profils de célérités du son en milieu marin et trajectoire de rayons

La vitesse du son dépend surtout de la température, de la pression et de la salinité. Or, en milieu océanique, ces paramètres varient en fonction de la profondeur et subissent l’influence des saisons.

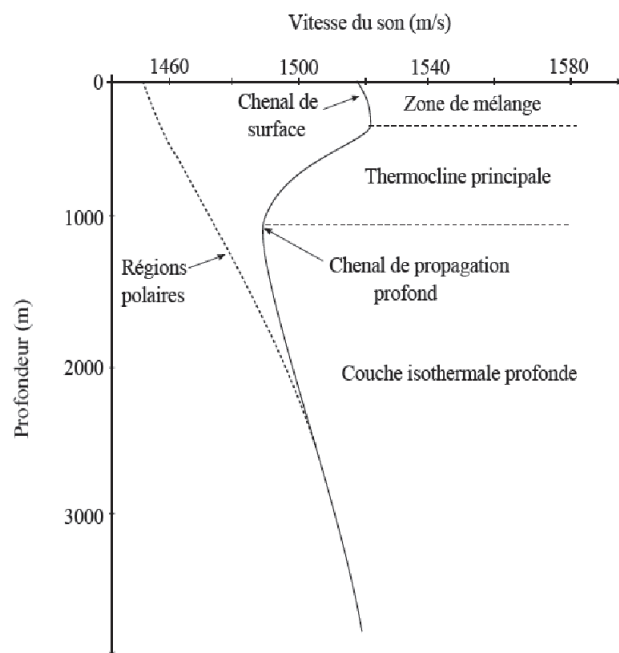


FIGURE 4.12 – Profils de célérité typique.

L'onde acoustique se propage donc dans un milieu dont la célérité varie continûment. Le tracé de rayon en milieu océanique peut se résoudre par une généralisation de la loi de Snell-Descartes. En effet, cette situation peut s'approcher en considérant que l'onde se propage dans un milieu à n interfaces d'indice variable. Selon la loi de Snell-Descartes chacune d'elle va dévier la direction d'un rayon. La propagation d'un rayon n'est plus géométrique (ie rectiligne). Toutefois, l'approximation rectiligne reste valable par petits fonds, c'est-à-dire lorsque $h < 10\lambda$, avec λ la longueur d'onde.

Les situations de profil de célérité présentant des minima locaux engendrent des chenaux de propagation. Ce sont de véritables guides d'onde, où l'énergie acoustique est canalisée sur de longues distances. Le profil décrit en figure 4.12 présente 2 minima créant un chenal de surface et un chenal de propagation profond.

Les figures 4.13 et 4.14, présentent un exemple de trajet de rayon et une simulation de lancé de rayon.

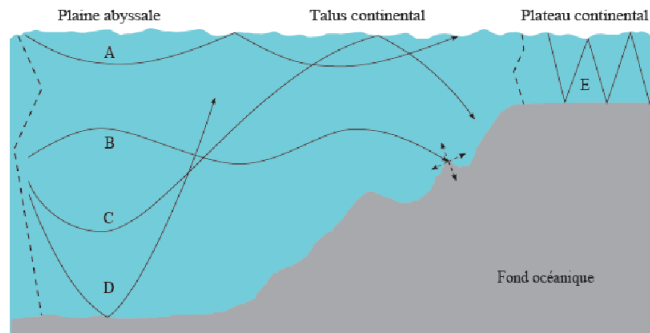


FIGURE 4.13 – Exemple de trajets multiples en milieu océanique [19].

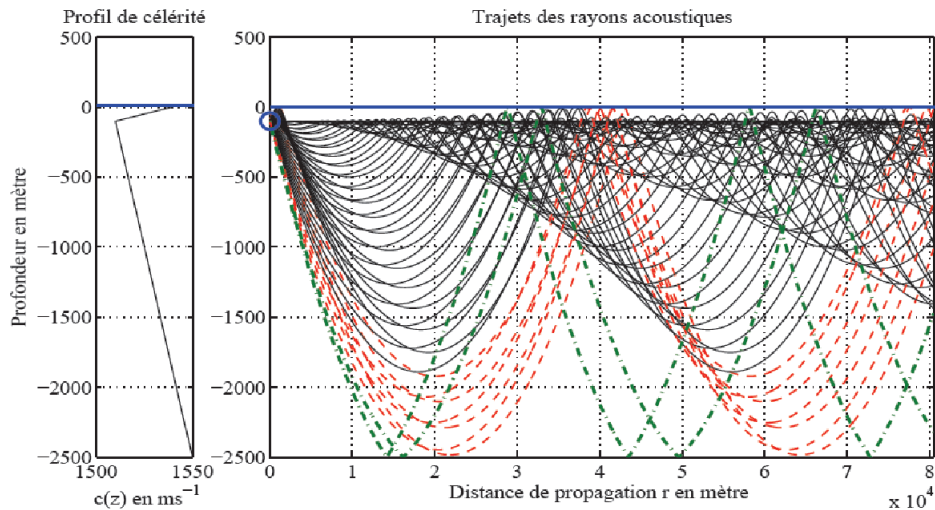


FIGURE 4.14 – Profil de célérité et tracé de rayons typiques de la mer Méditerranée. La source est située à une profondeur de 100 mètres et est illustrée par un cercle. On peut remarquer la présence de rayons réfractés (traits pleins), de rayons réfractés et réfléchis en surface (traits hachurés) et de rayons réfractés, réfléchis fond et surface (traits pointillés hachurés) [19].

4.4.3 Proposition d'aide aux mesures de gestion des risques dus aux pétardages

DYNI/LSIS dispose d'un logiciel de propagation acoustique en milieu océanique dédié aux Iles d'Or (étude faite en 2009). Ce logiciel, nommé "PROPAOR", pourra être utilisé selon les objectifs de prédiction d'impact des ondes sonores en lien direct avec le PNPC. Il simule les trajectoires des rayons de fronts d'onde, émis par une source dont la position est connue tenant compte de l'environnement (bathymétrie, profil de célérité). Le niveau sonore, en un point distant

de la source, est ainsi évalué. Voir section III pour les références théoriques.

A partir :

- des coordonnées (x, y, z) d'une source sonore
- d'informations sur le profil bathy-célérimétrique de la zone
- d'informations sur les flux des espèces, notamment suivant les saisons
- d'une estimation du niveau sonore à la source en dB
- la sensibilité estimée des différentes espèces de cétacés de la région

Nous pouvons proposer un volume critique autour de la source pour chaque espèce, en dehors duquel, on pourrait penser que l'impact du son sur les animaux serait jugé comme acceptable. Il nous sera aussi possible de proposer d'autres coordonnées pour la source. Le jour des essais, une équipe d'observateurs pourrait surveiller le volume critique et suggérer de différer ou reporter les tirs. La prise en compte de ces résultats permettrait à la Marine d'organiser ses essais et entraînements tout en s'adaptant à la présence des mammifères marins.

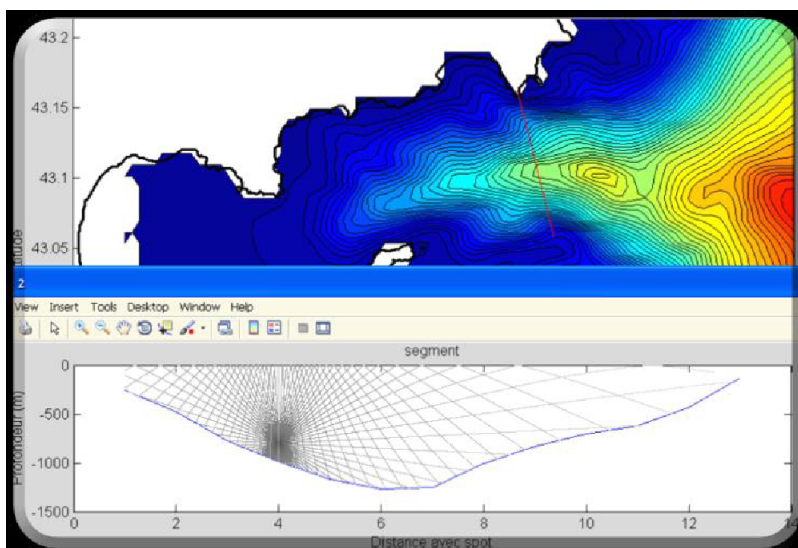


FIGURE 4.15 – Exemple de cartes obtenues avec le logiciel PROPAOR dédié aux Iles d'Or.

Chapitre 5

Détection visuelle de cétacés : applications aux ailerons de dauphins

5.1 Introduction

L'objectif de cette partie, réalisée lors du stage de fin d'étude de Céline Rabouy [29], est de montrer l'intérêt d'utiliser une méthode d'estimation de similarité visuelle entre objet 3D. Les données à traiter sont des images d'ailerons de dauphin. En effet, la base de données a été fournie par le vétérinaire, directeur du centre de cétologie (GCEM), M. *F. Dhermain*. Elle est constituée d'une centaine d'images réparties en deux catégories, aileron gauche - aileron droit.

Les experts sur le terrain utilisent des catalogues de 50K images pour identifier les individus (on retrouve souvent sur 10 ans, les individus à des sites éloignés). Les experts regardent les textures et les profils pour associer les images. Nous traitons ici le cas des profils par modélisation de données fonctionnelles.

Dans un premier temps, le profil de l'aileron est extrait afin de pouvoir effectuer une modélisation. Cette extraction du profil va mettre en avant différentes techniques de segmentation ainsi que des techniques de filtrage (Filtrage Adapté Stochastique - FAS) ou encore l'utilisation des ondelettes (algorithme de Mallat) pour uniformiser certaines zones.

Puis, dans un second temps, la paramétrisation des profils des ailerons est réalisée à partir des différentes méthodes de régression, comme la régression polynomiale ou encore les splines de régression.

Dans un dernier temps, est présentée l'analyse d'une vingtaine d'images d'individus, afin de voir lesquels sont les plus proches entre eux. La méthode de l'alignement dynamique puis celle de l'analyse de la similitude des paramètres appliquée aux coefficients de la méthode de régression sont comparées. Cette dernière est la plus performante.

5.2 Segmentation d'image

Les images sont considérées comme un des moyens les plus importants de la connaissance de l'information. La compréhension des images et l'extraction de l'information à partir de ces dernières sont un aspect important pour l'apprentissage machine. Un traitement préalable consiste tout d'abord à faire une segmentation de l'image.

5.2.1 Algorithme du clustering k-means

L'algorithme k-means [32] est un algorithme de classification non-supervisé qui range les données d'entrée dans différentes sous-parties en se basant sur leur distance par rapport aux centroïdes initialisés préalablement, $\mu_i \forall i = 1 \dots k$ qui sont obtenus par la minimisation de :

$$V = \sum_{i=1}^k \sum_{x_i \in S_i} (x_i - \mu_j)^2 \quad (5.1)$$

où il y a k clusters S_i , $i = 1, 2, \dots, k$ et μ_i est le centroïde de la classe $C^{(i)}$ de x_i .

Pour les images, les étapes de l'algorithme sont les suivantes :

1. On initialise les centroïdes avec des intensités aléatoires de k .
2. On clusterise les points basés à la distance de leurs intensités à partir des intensités des centroïdes :

$$c^{(i)} := \arg \min_j \| x_i - \mu_j \|^2 \quad (5.2)$$

3. On calcule les nouveaux centroïdes pour chacun des clusters.

$$\mu_i := \frac{\sum_{i|C^{(i)}=j} x_i}{\sum_{i|C^{(i)}=j} j} \quad (5.3)$$

4. On répète les deux étapes précédentes jusqu'à ce que les centroïdes soient fixes.

où k est le nombre de classes fixe, i le nombre d'itérations sur toutes les intensités, j le nombre d'itérations sur tous les centroïdes et μ_i sont les centroïdes des intensités.

5.2.2 Méthode d'ondelettes

Une ondelette (cf [10], [23]) est une petite onde (figure 5.1). Une fonction est considérée comme une ondelette si elle est limitée en durée, oscillante. Elle doit être, au minimum, de moyenne nulle :

$$\int_{\mathbb{R}} \Psi(t) dt = 0 \quad (5.4)$$

Le nombre de moments nuls peut être d'intérêts :

$$\int_{\mathbb{R}} t^{m-1} \Psi(t) dt = 0 \quad (5.5)$$

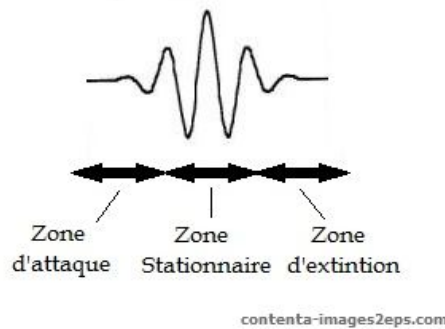


FIGURE 5.1 – Figure d'une ondelette

Si M moments sont nuls, on parle d'ondelette de classe M . $\Psi(t)$ est appelée ondelette mère, elle permet de générer une famille d'ondelettes par décalage, dilatation :

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (5.6)$$

On utilise les ondelettes uniquement lorsque le signal étudié n'est pas stationnaire. Selon la nature du signal et selon l'application visée, on aura recours à une famille d'ondelette ou à une autre. Les algorithmes d'analyse et de reconstruction utilisés se trouvent dans la partie annexe de ce chapitre.

5.2.3 Méthode de Filtrage adapté stochastique (FAS)

Description du FAS sous contrainte

L'objectif de cette partie est de poser les bases nécessaires pour l'application du Filtrage Adapté Stochastique (FAS) (cf [33] [8]). Nous allons utiliser le FAS sous contrainte car il permet de maximiser le rapport signal à bruit dans un sous-espace de dimension p . Les signaux aléatoires stationnaires sont le domaine d'application du FAS. Ils sont définis sur n échantillons.

La réalisation d'un filtrage linéaire consiste à projeter le signal étudié sur un vecteur V_i . La projection de ce signal s'écrit alors :

$$S_p(m) = \sum_{i=1}^p \alpha_i V_i(m) \quad (5.7)$$

La puissance associée à ce processus que l'on peut transformer en une somme unique sur i , est définie comme étant :

$$P = E[S_p^T S_p] = \sum_{i=1}^p E[\alpha_i^2] = \sum_{i=1}^p V_i^T A V_i \quad (5.8)$$

On se place alors maintenant dans le cadre où l'on est en présence du signal constitué de deux processus aléatoires décorrelés, l'un d'intérêt, l'autre non. Le

gain calculé à partir du rapport signal à bruit s'écrit de la manière suivante, après normalisation :

$$\rho = \frac{X^T A X}{X^T B X} \quad (5.9)$$

La détermination du sous-espace optimal va nous permettre de maximiser ce gain. L'équation que doivent satisfaire les vecteurs constituant la base optimale est l'équation aux vecteurs propres défini par :

$$(A - \rho B)X = X\mu \quad (5.10)$$

avec μ , matrice diagonale.

D'après cette équation, qui peut se réécrire comme suit :

$$\sum_{i=1}^p X_i^T (A - \rho B) X_i = \sum_{i=1}^p \mu_i \quad (5.11)$$

Si on range les X_i dans le bon ordre, de façon à ce que les p premiers vecteurs soient les bons, on obtient :

$$\sum_{i=1}^p \mu_i = 0 \quad (5.12)$$

De manière générale, si la somme de q valeurs propres est nulle, cela ne signifie pas pour autant que le sous espace engendré par ces vecteurs soit celui recherché.

Application du FAS sous contrainte

Lorsque l'on est en présence de signaux gaussiens stationnaires, le logarithme du rapport de vraisemblance se met sous la forme suivante :

$$\Theta(n) = \sum_{i=1}^n z_i^2 \frac{\lambda_i}{1 + \lambda_i} \quad (5.13)$$

où z_i est le résultat du filtrage du signal par la nouvelle base X . $\Theta(n)$ est appelée fonctionnelle à l'ordre n du FAS. On peut aussi effectuer un blanchiment du bruit, ce qui revient à faire :

$$\begin{aligned} X^T A X &= \text{diag}\{\lambda_i\} \\ X^T B X &= I_N \end{aligned}$$

On est alors en présence du filtre de Karuhnen-Loeve qui est un cas particulier du FAS.

Dans le cadre de deux textures, cela revient à calculer des filtres qui sont adaptés à la détection de la texture utile et qui rejettent la texture bruit. Pour construire les images qui seront utilisées par la suite, il existe deux méthodes :

- L'image à traiter correspond à un mélange instantané de deux textures. La texture utile doit être détectée en présence de la texture bruit.
- L'image est constituée comme étant la superposition d'une texture du "bruit blanc", avec exclusivement, la texture utile.

5.3 Méthodes d'approximation de fonctions

5.3.1 Introduction

Contexte de l'analyse de fonctions

Dans de nombreux domaines d'applications, les observations sont des fonctions. Pour cette raison, les méthodes pour l'analyse de ces données sont décrites par le terme de FDA (Functional Data Analysis) [9]. Les objectifs du FDA sont essentiellement les mêmes que pour les autres branches de la statistique, à savoir :

1. La représentation de données et leurs transformations pour les analyses rapides,
2. La visualisation des données pour les caractéristiques variées à mettre en évidence,
3. L'explication de variations dans un résultat ou d'une variable dépendante par l'utilisation d'entrée ou d'une variable indépendante.

Nous allons par régression décrire, ici, trois types de familles permettant de modéliser des courbes : régression polynomiale, régression par spline, régression par B-spline.

Régression polynomiale et de régression par spline

Soit y , la variable réelle dépendante et x , la variable d'entrée indépendante. Dans une perspective probabiliste, en régression. On essaye de modéliser la distribution conditionnelle de la sortie y par rapport à l'entrée x , qui est $p(y|x)$:

$$y = f(x) + \epsilon \quad (5.14)$$

où la fonction $f(\cdot)$, qui est l'espérance conditionnelle $E[y|x]$, peut être paramétrique ou non, linéaire ou pas et ϵ_i , un bruit additif gaussien standard.

5.3.2 Régression polynomiale

On suppose que l'on dispose du modèle décrit précédemment. La fonction f de la régression polynomiale peut être explicitée de la forme suivante :

$$y_j = f(x_j, \beta) + \sigma\epsilon_j = \sum_{l=0}^P \beta_l x_j^l + \sigma\epsilon_j \quad (5.15)$$

$$= \beta^T x_j + \sigma\epsilon_j; \epsilon_j \mathcal{N}(0, 1) (j = 1, \dots, m) \quad (5.16)$$

où β est le vecteur des coefficients de régression. Ce modèle peut être reformulé sous forme de matrice :

$$y = X\beta + \epsilon \quad (5.17)$$

avec :

$$- y = (y_1, \dots, y_m)^T$$

$$\epsilon = (\epsilon_1, \dots, \epsilon_m)^T$$

$X = (t_1, \dots, t_m)^T$ matrice de régression de dimension $n \times (p+1)$

m étant le nombre d'observations.

5.3.3 Splines de régression

Les splines [11] [27] sont largement utilisées et consistent en une régression par morceaux avec des contraintes de régularités. Une spline d'ordre M avec K noeuds $\xi_0 < \xi_1, \dots, < \xi_K < \xi_{K+1}$, ξ_0 et ξ_{K+1} étant les deux noeuds à la frontière, est un polynôme par morceaux de degré $p = M - 1$ avec des dérivées continues au niveau des noeuds jusqu'à l'ordre $M - 2$. La fonction de régression spline peut s'écrire :

$$f(x_i) = \sum_{j=1}^{K+M} \beta_j h_j(x_j) \quad (5.18)$$

où la base de puissance tronquée $h_j(x_j)$ est définie comme suit :

$$\begin{aligned} - h_j(x) &= x_i^{j-1}, j = 1, \dots, M \\ - h_{M+k}(x_i) &= (x_i - \xi_k)_+^{M-1}, k = 1, \dots, K \end{aligned}$$

avec $(x_i - \xi_k)_+ = x_i - \xi_k$ si $x_i > \xi_k$ et $(x_i - \xi_k)_+ = 0$ sinon. Le vecteur de paramètre $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_{M+K})$ est le vecteur des coefficients de la spline. La forme matricielle de la spline s'écrit :

$$f = \mathbf{X}\beta \quad (5.19)$$

où \mathbf{X} est une matrice de régression de dimension $n \times (M + K)$ avec $\mathbf{X}_{ij} = h_j(x_i)$ Chaque colonne de la matrice se construit comme suit :

$$\mathbf{X}_i = [1, x_i, x_i^2, \dots, x_i^p, (x_i - \xi_1)^p, \dots, (x_i - \xi_K)^p] \quad (5.20)$$

Les coefficients de la spline sont estimés par minimisation de l'erreur quadratique :

$$C(\beta) = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2 \quad (5.21)$$

Suite aux calculs, la solution est :

$$\hat{\beta} = \arg \min_{\beta} (\mathbf{y} - \mathbf{X}\beta)^T (\mathbf{y} - \mathbf{X}\beta) \quad (5.22)$$

$$= (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (5.23)$$

La courbe approximée est donnée par :

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{X}\hat{\beta} \quad (5.24)$$

et chaque point est donné par :

$$\hat{y}_i = \hat{f}(x_i) = \sum_{j=1}^{M+K} \hat{\beta}_j h_j(x_i), i = 1, \dots, m \quad (5.25)$$

Les splines les plus largement utilisées sont les splines cubiques (une spline cubique est une spline d'ordre 4, incluant donc des polynômes d'ordre 3) qui sont très adaptées pour les formes de courbes lisses grâce à la continuité des dérivées première et seconde de la fonction polynômiale par morceaux à l'intérieur des noeuds. On peut aussi noter que, dans une régression par spline, le placement des noeuds est fixé soit par l'utilisateur soit par une répartition uniforme dans l'espace des entrées. Dans notre étude, les splines que nous avons utilisées sont les splines cubiques naturelles, les splines cubiques sous contraintes et les B-splines. Les détails concernant ces fonctions se trouvent en annexe de

5.3.4 Estimation des paramètres

Les paramètres $\Psi = (\beta, \sigma^2)$ des modèles de régression, y compris la régression polynômiale, les splines et B-splines de régression, sont estimés par la méthode du maximum de vraisemblance ou par équivalence en minimisant l'erreur quadratique dans le cas gaussien [20]. Soit un ensemble de m paires définies par $(\mathbf{y}, \mathbf{t}) = ((t_1, \mathbf{y}_1), \dots, (t_m, \mathbf{y}_m)$, la fonction de probabilité de Ψ est donnée par :

$$L(\Psi) = \log \prod_{j=1}^m \mathcal{N}(y_j, \beta^T \mathbf{t}_j, \sigma^2) \quad (5.26)$$

$$= -(1/2) \times \left[\sum_{j=1}^m \left(\frac{y_j - \beta^T \mathbf{t}_j}{\sigma} \right)^2 + m \log \sigma^2 \right] + cst \quad (5.27)$$

La solution pour β est donc calculée par minimisation de l'erreur quadratique. Le vecteur des coefficients estimé $\hat{\beta}$ est donné par :

$$\hat{\beta} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (5.28)$$

où la matrice \mathbf{X} diffère en fonction du modèle choisi. Pour les splines régularisées (ou splines cubiques avec contraintes), la fonction optimale à calculer, correspond à la résolution du problèmes des moindres carrés et les coefficients de régression dans ce cas sont donnés par :

$$\hat{\beta} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X} + \lambda \mathbf{\Gamma})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (5.29)$$

où $\mathbf{\Gamma}$ est une matrice carrée de même dimension que le vecteur β , ces éléments sont les intégrations au carré des dérivées secondes de $f(\cdot)$.

Finalement, l'estimation de la variance σ^2 est donnée par la minimisation de :

$$\frac{1}{\sigma^2} \sum_{j=1}^m (y_j - \beta^T \mathbf{t}_j)^2 + m \log \sigma^2 \quad (5.30)$$

L'estimé est alors :

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (y_j - \hat{\beta}^T \mathbf{x}_j)^2 \quad (5.31)$$

$$= (1/m) \times (\mathbf{y} - \mathbf{X}\hat{\beta})^T (\mathbf{y} - \mathbf{X}\hat{\beta}) \quad (5.32)$$

5.4 Résultats de la segmentation d'image d'aileron de dauphins

5.4.1 Segmentation d'image

Pour illustrer notre approche, l'image, sur laquelle nous allons effectuer et montrer les résultats de la segmentation, porte le nom suivant : (cf 5.2).



FIGURE 5.2 – *D_PQ-01Frioul_2011_0310_ABn_0305xPQ-01FR-03*

Application de l'algorithme k-means pour la segmentation

Ici, on fixe le nombre de classe. Le cas idéal pour les images étudiées est d'avoir deux plans : un contenant le dauphin, et l'autre la mer. Les applications sur cette image nous montrent que cela est possible. On distingue clairement le dauphin du reste de son environnement. Il faut aussi noter l'importance de la qualité de l'image. Dans la base de données étudiée, il existe des images floutées sur lesquelles, il est quasiment impossible de faire un traitement.

Sur d'autres images, cette distinction est moins nette. En effet, en fonction de la luminosité, on a un reflet dans l'eau qui provoque un mélange et donc une mauvaise séparation du dauphin et de l'eau. Augmenter le nombre de plans, permet

de palier à ce problème. Voici plusieurs exemples sur des ailerons de différents dauphins (cf 5.3) de la manière suivante : D_PQ-01 Frioul_2011_0310_ABn_0305 x PQ-01 FR-03 et son clustering (2 plans) ; D_FR-12 Frioul_2011_0310_ABn_0447 FR-12 et son clustering (4 plans) ; G_SCAN-D 070424 17h Revellata SDu 340 et son clustering (2 plans). La présence de gouttelettes d'eau peut parfois rendre

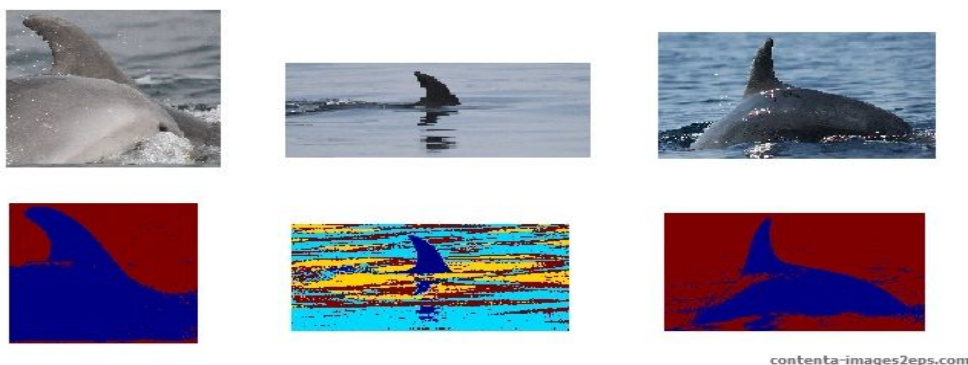


FIGURE 5.3 – Clustering k-means appliqué à 3 images

la segmentation inutile. Lorsque l'on augmente le nombre de plan du clustering, cela n'améliore pas forcément le résultat.

Pour cela, nous allons utiliser deux méthodes qui vont nous permettre d'améliorer les quelques défauts des images de la base de données. Les défauts à améliorer sont la diminution de la luminosité, afin qu'elle ait un effet moindre, et l'atténuation des gouttelettes d'eau. Deux méthodes sont utilisées : tout d'abord le Filtrage Adapté Stochastique (FAS), puis la reconstruction d'images par les ondelettes avec l'algorithme de Mallat.

Application du FAS sur les images

Le temps de calcul du FAS est très long. Pour cela, nous avons réduit le nombre d'itérations qui est très lourd. Les résultats obtenus sont montrés par la figure 5.4 :

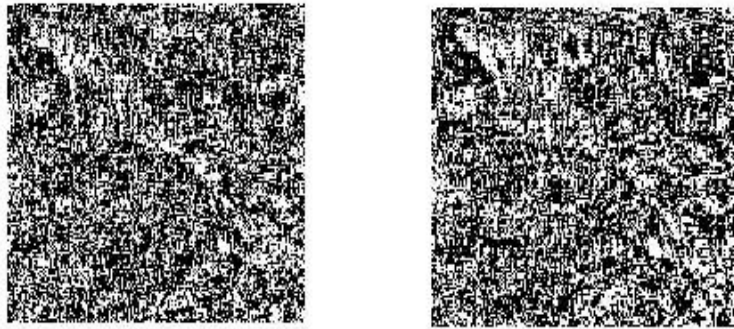
On ne peut pas faire de distinction entre la texture de la mer et la texture du dauphin. En effet, les deux textures sont très proches, ce qui ne permet pas de faire une bonne séparation.

Application de la méthodes des ondelettes avec l'algorithme de Mallat

L'algorithme de Mallat permet d'avoir un résultat dans de brefs délais. En effet, le nombre d'itérations à effectuer est plus court (la durée estimée pour effectuer la boucle de calcul est d'environ quelques secondes pour une image). Pour ce faire, on utilise les ondelettes de haar (père et mère) qui sont de la forme suivante :

- $g = [1 \ -1]/\sqrt{2}$ ondelette père

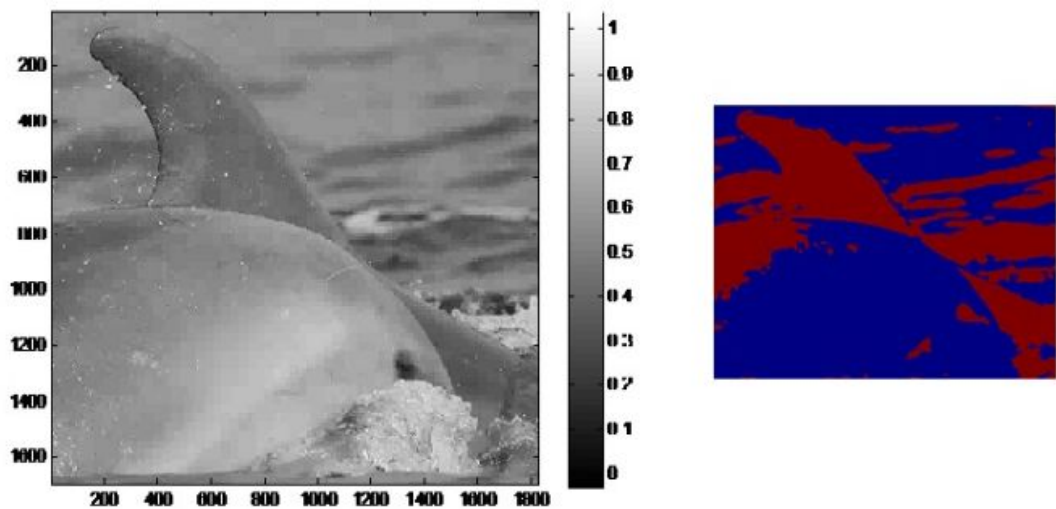
- $h = [1 \ 1]/\sqrt{2}$ ondelette mère



contenta-images2eps.com

FIGURE 5.4 – FAS appliqué à notre image test pour différents nombres d'itérations N et gains p - à droite $N = 25$, $p = 22$, à gauche $N = 26$, $p = 25$

Les résultats obtenus (cf figure 5.5) sont :



contenta-images2eps.com

FIGURE 5.5 – Application de l'algorithme multirésolution de Mallat - Application du clustering k-means au résultat

On constate un lissage de l'image, donc d'une diminution de la luminosité et de la présence des gouttelettes d'eau. Cependant, lorsque l'on applique le clustering k-means pour séparer les plans, le résultat escompté n'est pas à la hauteur de notre attente. En effet, on a un mélange des données rendant la détection de

l'aileron quasiment impossible.

Le traitement par les ondelettes, on tend à diminuer la qualité des images. Cela se vérifie dans cet exemple où l' image qui est de très bonne qualité, perd de l'information après le passage des ondelettes.

Pour conclure cette première sous-partie, l'utilisation du clustering k-means donne des résultats très convaincants. En effet, plus de la moitié des images peut être traitée de cette manière. L'application du FAS s'avère très coûteux en temps et ne donne pour le moment pas de résultat probant. Les ondelettes auraient pu s'avérer utiles dans le cadre de la segmentation, mais l'algorithme employé ne permet pas d'améliorer les résultats.

Nous allons maintenant nous intéresser à la détection du contour de l'aileron. Pour cela, nous allons travailler uniquement sur des portions d'image ne contenant que les données utiles.

5.4.2 Détection des contours

On va appliquer une fonction morphologique permettant d'obtenir la 'trace' de l'aileron. L'image que l'on obtient après la segmentation est une image contenant des 0 et des 1. Grâce à cette fonction morphologique, on applique tout d'abord une érosion ('erose'), cela permet d'enlever les points blancs et de ne laisser que la trace de l'aileron. Ensuite, une fonction de mise en propre ('clean') qui permet de supprimer tous les points blancs solitaires. Pour finir, on utilise une suppression ('remove'), qui va mettre à 0 un pixel dont les voisins proches sont à un pixel de 1. L'image obtenue est (figure 5.6) :

Les images obtenues ne nous présentent plus que la trace de l'aileron. En effet, plus de 90% des points blancs qui nous gênaient ont été supprimés. On se doit d'effectuer les opérations morphologiques citées ci-dessus dans cet ordre si l'on veut garder l'enveloppe de l'aileron du dauphin.

Une fois cette détection effectuée, il ne nous reste plus qu'à transformer cette image en données utilisables, c'est à dire que l'on va pouvoir traiter. Pour ce faire, on emploie les coordonnées polaires qui vont nous permettre d'obtenir le profil de l'aileron dans son intégralité. L'usage direct des coordonnées cartésiennes ne nous donne qu'une partie des données.

Le centre du plan est placé en bas à gauche de l'image. Les résultats obtenus sont en coordonnées polaires, puis en cartésiennes (cf figure 5.7) :

Mettre l'origine au centre de l'image pose un problème au passage par 0. Il apparaît des asymptotes verticales à cause de la tangente qui prend une valeur infinie.

D'autre part, nous avons séparé notre base de données en deux, à cause de l'orientation de l'aileron (gauche/droit). Une fois cette mise en fonction faite, nous allons pouvoir effectuer des approximations par les différentes méthodes de régression que nous avons présentée.



contenta-images2eps.com

FIGURE 5.6 – Image du dauphin $D_Ag - U07042417hRevellataSDu448_03$ avec le profil de son enveloppe

5.5 Résultats de l'approximation des fonctions de contour de l'aileron

Après avoir obtenu notre modélisation en coordonnées cartésiennes (provenant des coordonnées polaires), nous allons effectuer une régression des fonctions par les différentes méthodes que nous avons présentées précédemment, à savoir :

1. Régression polynomiale.
2. Régression par splines (avec variations du nombre de noeuds).
3. Régression par B-splines (avec variations du nombre de noeuds).

5.5.1 Régression polynomiale

On décide d'appliquer la régression polynomiale à toutes les courbes. Ici, nous allons montrer un exemple de plusieurs régressions polynomiales (ordre 4, 6, 8 et 10) sur l'image $G_PC - 29_PCJMB280605_039$.

Les courbes obtenues sont (cf figure 5.9) :

On remarque que plus l'ordre du polynôme augmente, plus l'approximation s'améliore, mais il faut faire attention au surapprentissage (c'est à dire, un polynôme avec un degré très important). Ainsi, l'approximation polynomiale est, pour des modèles complexes, efficace uniquement lorsque l'on choisit un polynôme de degré important.

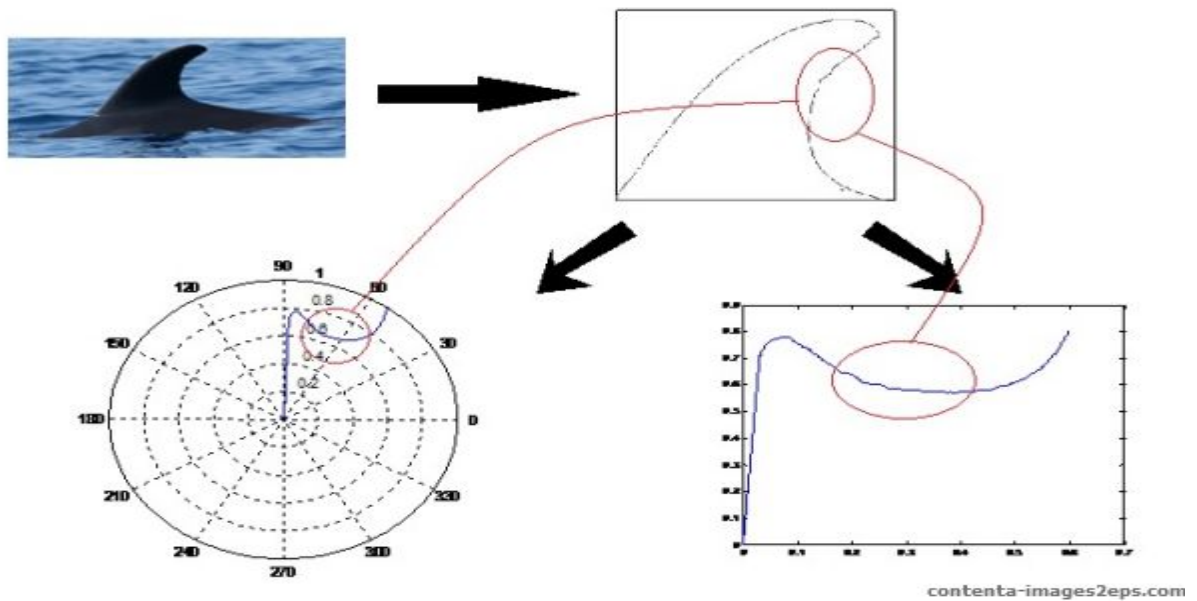


FIGURE 5.7 – Tracé du profil de l'aileeron par les coordonnées polaires du dauphin
G_ Aj-E 070423 galerie SDu 192



FIGURE 5.8 – G_PC – 29_PCJMB280605_039

On peut aussi regarder la courbe des résidus. Pour cela, il suffit de faire la différence entre le profil initial et la modélisation obtenue. Le premier constat que l'on peut faire est pour un polynôme de faible degré. On oscille autour de 0

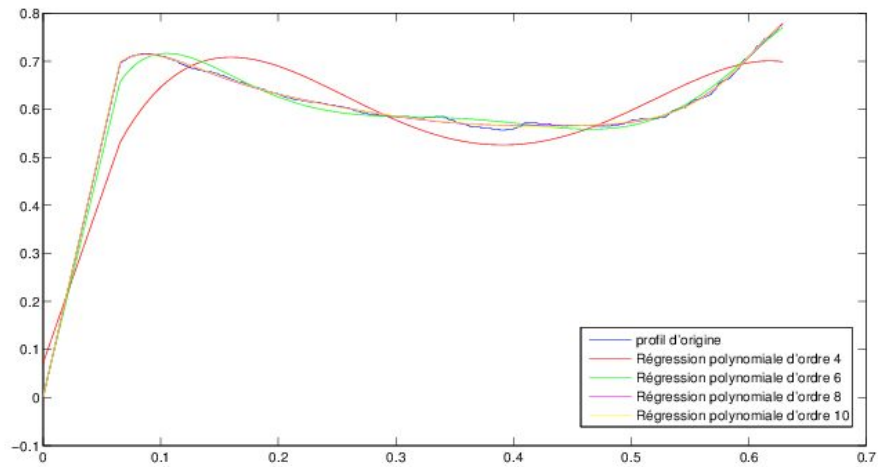


FIGURE 5.9 – Tracé de la régression polynomiale pour différents ordres sur le profil $G_PC-29_PCJMB280605_039$

avec des amplitudes plus ou moins importantes. Cette tendance diminue lorsque l'ordre du polynôme augmente : les oscillations sont de plus faibles amplitudes. Si le profil est complexe, la courbe du résidu qui en résulte sera très oscillante pour un polynôme de faible degré (cf figure 5.10).

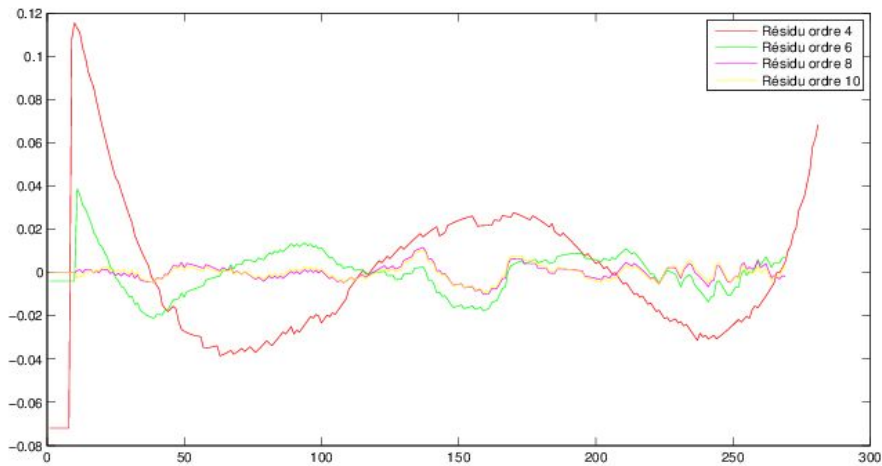


FIGURE 5.10 – Tracé des résidus pour différents ordres de la régression polynomiale sur le profil $G_PC-29_PCJMB280605_039$

On peut aussi tracer un histogramme correspondant à la répartition des écarts

entre le profil initial et le modèle pour une régression polynomiale d'ordre 4 et ensuite une régression polynomiale d'ordre 10. On applique la formule suivante (erreur quadratique) :

$$\Delta = \frac{1}{n} \sum_n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (5.33)$$

Avec n , le nombre de profils, y_i le i ème profil et \hat{y}_i , l'approximation correspondante. Les histogrammes obtenus sont (cf figures 5.11 5.12) :

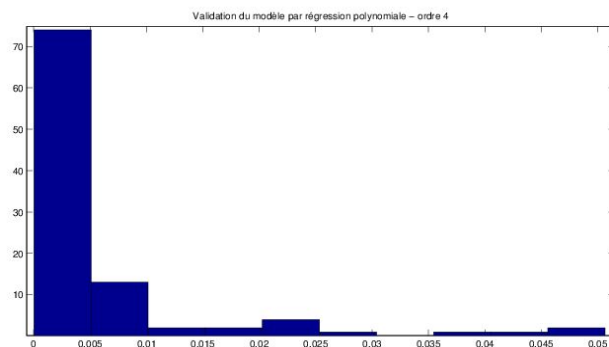


FIGURE 5.11 – Répartition des distances entre les profils et les modèles pour la régression polynomiale d'ordre 4 sur l'ensemble des profils

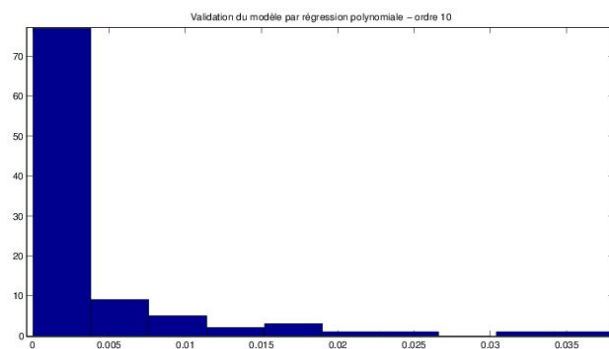


FIGURE 5.12 – Répartition des distances entre les profils et les modèles pour la régression polynomiale d'ordre 10 sur l'ensemble des profils

Pour 20 noeuds et toujours à l'ordre 4, on évite des erreurs au delà de $3,5 \cdot 10^{-4}$. On constate que cette régression permet de bien modéliser environ 30% des données pour un ordre faible. Ce pourcentage augmente légèrement avec l'ordre du polynôme.

5.5.2 Régression par splines

Lorsque l'on utilise une régression par spline, on peut faire varier le nombre de noeuds et l'ordre du polynôme (les polynômes auront le même ordre entre deux noeuds). Les noeuds sont espacés de manière uniforme. De ce fait, on ne considère pas qu'il y ait des changements de régime brutaux. Voici les résultats obtenus pour différents noeuds et l'ordre de la spline fixe (ici, on prend une spline d'ordre 4, donc, on aura des polynômes d'ordre 3) (cf 5.13 et 5.14).

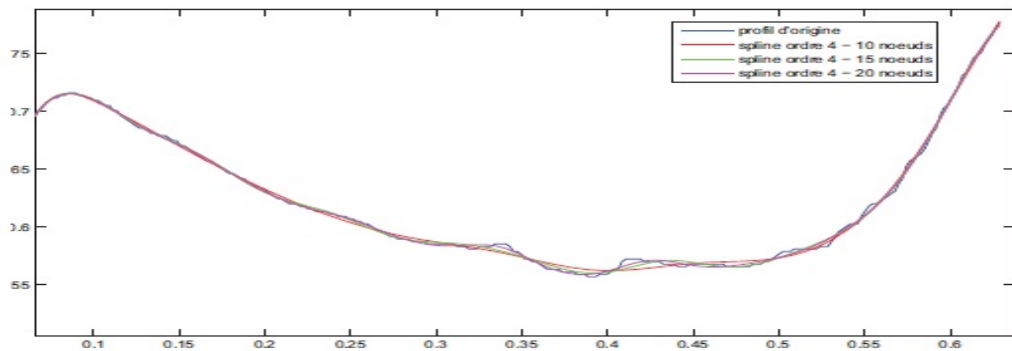


FIGURE 5.13 – Tracé de la régression par une spline d'ordre 4 et pour différents nombres de noeuds sur le profil $G_PC - 29_PCJMB280605_039$

On constate que plus on augmente le nombre de noeuds, plus on se rapproche de la réalité de la courbe. Comme pour l'approximation polynomiale, les courbes des résidus tendent à moins osciller lorsque l'on augmente le nombre de noeuds. Ces résultats nous indiquent que les splines sont plus performantes pour la régression de fonctions complexes qu'une simple régression polynomiale. Lorsque l'on applique à notre base de données, une spline d'ordre 4 avec 20 noeuds puis avec 10 noeuds, les histogrammes obtenus sont (cf figure 5.15 5.16) :

Les résultats dépassent les 50%. Les splines de régression permettent une meilleure approximation des fonctions et peuvent donc être considérées comme un des choix pour l'approximation de profils complexes. Ceci se comprend. En effet, on a un polynôme d'ordre 3 ($N - 1$, avec $N = 4$), entre chaque noeud, ce qui permet de mieux s'approcher de la courbe.

5.5.3 Régression par B-splines

Ici, on peut faire le même constat que pour la régression par splines. La B-spline, a une tendance à mieux 'coller' à la fonction par rapport à la régression

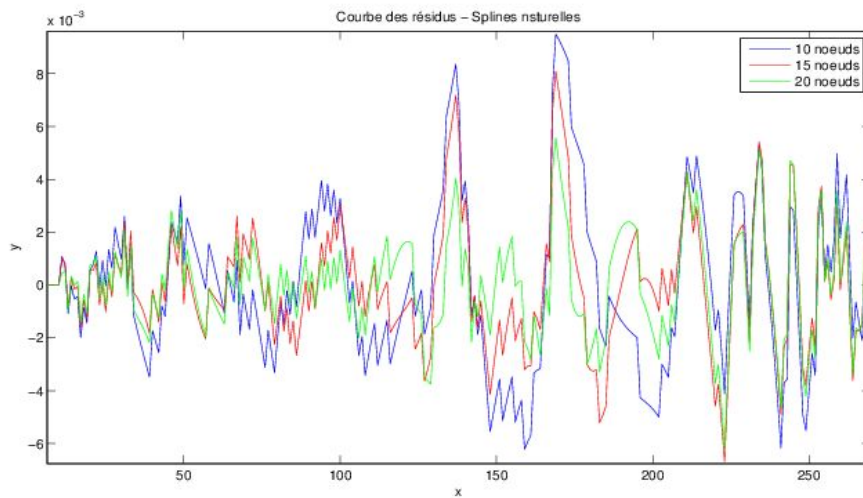


FIGURE 5.14 – Tracés des courbes des résidus liées à la régression par une spline d'ordre 4 et pour différents nombres de noeuds sur le profil $G_PC - 29_PCJMB280605_039$

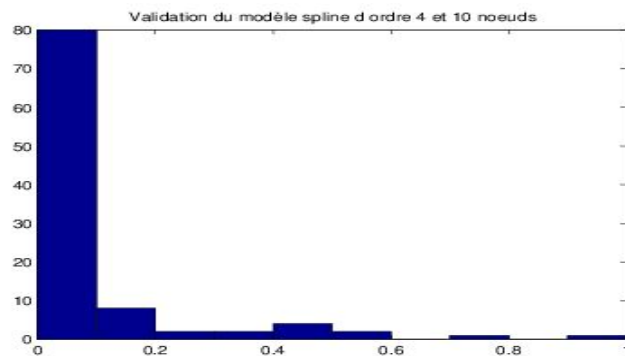


FIGURE 5.15 – Répartition des distances entre les profils et les modèles pour la régression par une spline d'ordre 4 avec 10 noeuds sur l'ensemble des profils

polynomiale. Les courbes des résidus, nous montrent aussi des oscillations autour de 0 avec des amplitudes qui sont moins importantes avec l'augmentation du nombre de noeuds (voir figures 5.17, 5.18 et 5.19).

5.6 Conclusion

Les familles des courbes splines s'avèrent être de meilleures méthodes pour approximer des fonctions complexes et ce, par rapport à la régression polynomi-

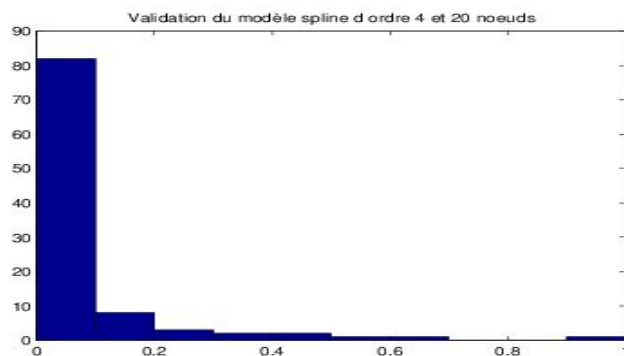


FIGURE 5.16 – Répartition des distances entre les profils et les modèles pour la régression par une spline d’ordre 4 avec 20 noeuds sur l’ensemble des profils

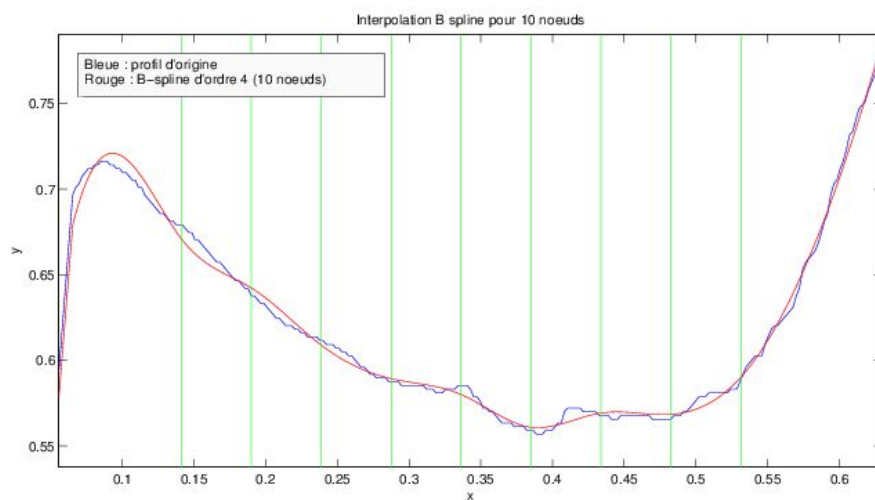


FIGURE 5.17 – Tracé de la régression par une B-spline d’ordre 4 avec 10 noeuds sur le profil $G_PC - 29_PCJMB280605_039$

ale. Cela est dû au principe même des splines : on approxime une fonction sur un intervalle donné, alors que l’approximation polynomiale considère la fonction à approximer dans son intégralité.

L’étape supplémentaire que l’on pourrait ajouter consisterait à voir l’impact de la répartition non uniforme des noeuds. Cela améliorerait certainement l’approximation de certaines zones, notamment celles où les changements sont répartis de façon non réguliers.

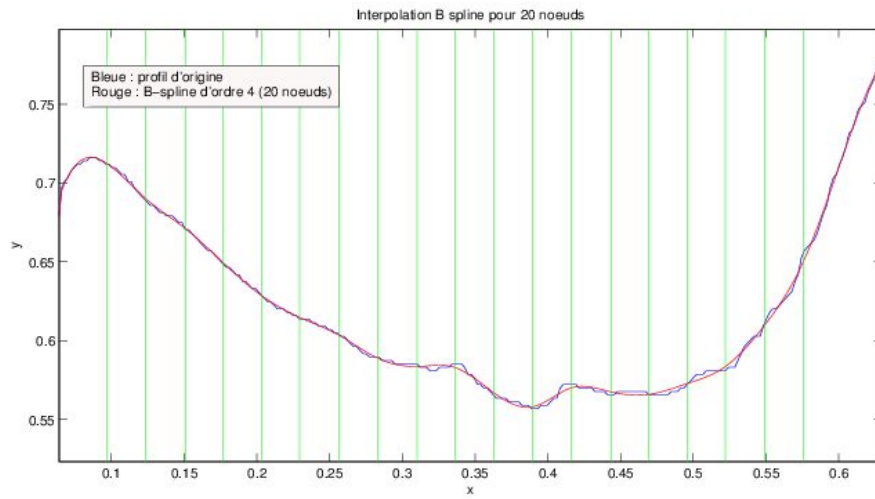


FIGURE 5.18 – Tracé de la régression par une B-spline d'ordre 4 avec 20 noeuds sur le profil $G_PC - 29_PCJMB280605_039$

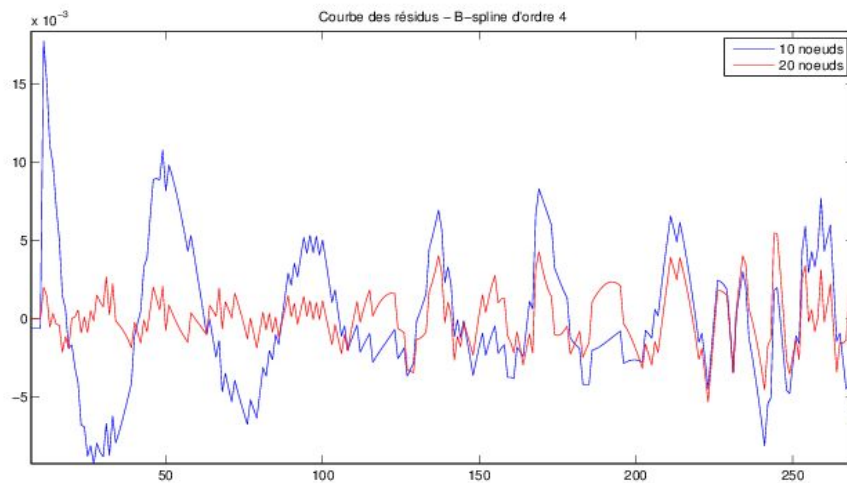


FIGURE 5.19 – Tracé du résidu de la régression B-spline sur le profil $G_PC - 29_PCJMB280605_039$

5.7 Annexe

5.7.1 Analyse multirésolution

On se place dans $\mathcal{L}^2(\mathbb{R})$, espace des signaux d'énergie finie. On définit un projecteur A_m (opérateur linéaire) tel que :

$$A_m x \in V_m \quad (5.34)$$

avec V_m sous espace de $\mathcal{L}^2(\mathbb{R})$.

Une analyse multirésolution est construite à partir de sous-espace V_m emboîtés les uns dans les autres, tel que le passage d'un sous-espace à un autre résulte d'un changement d'échelle. Voici les conditions que doivent satisfaire l'analyse multirésolution :

- Le passage de V_m à V_{m+1} se fait par une dilatation d'un facteur 2.

$$\text{si } x(t) \in V_m, \text{ alors } x\left(\frac{t}{2}\right) \in V_{m+1} \quad (5.35)$$

-

$$V_{m+1} \subset V_m \quad (5.36)$$

- Invariance par translation :

$$\text{si } x(t) \in V_m, \text{ alors } x(t - \tau) \in V_m \quad (5.37)$$

- A résolution minimale, on perd toute l'information.
- A résolution infinie, on a la totalité de l'information.
-

$$\text{si } x(t) \in V_m, \text{ alors } x(2^n t) \in V_0 \quad (5.38)$$

On définit alors une fonction d'échelle, appelée aussi ondelette père.

$$\varphi_{m,n} = 2^{-m/2} \varphi(2^{-m}t - n) \quad (5.39)$$

Cette base sera orthogonale si :

$$\int \varphi(t) \varphi^*(t - n) dt = \delta(n) \quad (5.40)$$

avec $\delta(n)$, le symbole de Kronecker. Alors l'opération avec le projecteur se réécrit :

$$A_m x(t) = \sum_n \langle x; \varphi_{(m,n)} \rangle \varphi_{(m,n)} \quad (5.41)$$

Le passage de V_m à V_{m+1} se traduit par une perte de l'information, on a alors le sous-espace complémentaire W_m défini comme :

$$V_m \oplus W_m = V_{m-1} \quad (5.42)$$

On définit une fonction ondelette, ou encore ondelette mère qui par dilatation et transformation engendre W_m . On la note $\Psi(t)$ et on a :

$$\Psi_{m,n}(t) = 2^{-m/2} \Psi(2^{-m}t - n) \quad (5.43)$$

W_m forme aussi une base orthogonale qui se traduit par :

$$\langle \Psi_{(m,n)}(t); \Psi_{(k,p)}(t) \rangle = \delta(p - n) \delta(k - m) \quad (5.44)$$

D'où :

$$A_{m-1} x = A_m x + \sum_n \langle x(t); \Psi_{(m,n)} \rangle \Psi_{(m,n)} = A_m x + W_m \quad (5.45)$$

5.7.2 Algorithme de l'analyse multirésolution - Algorithme de Mallat

Algorithme d'analyse

On a vu que $V_m \in V_{m-1}$ et plus particulièrement $V_0 \in V_{-1}$ avec les fonctions d'échelle associées. Il existe donc un lien entre $\varphi_{(0,n)}(t)$ et $\varphi_{(-1,n)}(t)$. On définit une suite $h(n)$ telle que :

$$\varphi(t) = \sum_n h(n)\varphi_{(-1,n)}(t) \quad (5.46)$$

$$= \sum_n h(n)2^{+1/2}\varphi(2t-n) \quad (5.47)$$

$$= \sqrt{2} \sum_n h(n)\varphi(2t-n) \quad (5.48)$$

Cette équation est appelée équation d'échelle sur les fonctions d'échelle. Quelque soit la fonction d'échelle sur $h(n)$, la décomposition reste la même.

$$\varphi(t) = \sqrt{2} \sum_n h(n)\varphi(2t-n) \quad (5.49)$$

$$2^{-m/2}\varphi(2^{-m}\tau - k) = \sqrt{2} \sum_n 2^{-m/2}h(n)\varphi(2(2^{-m}\tau - k) - n) \quad (5.50)$$

$$\varphi_{m,k} = 2^{-\frac{m-1}{2}} \sum_n h(n)\varphi(2^{-m-1}\tau - 2k - n) \quad (5.51)$$

$$= \sum_n h(n)\varphi_{(m-1,2k+n)}(\tau) \quad (5.52)$$

On définit les coefficients d'approximations, tels que :

$$a_k^m = \langle x; \varphi_{(m,k)} \rangle \quad (5.53)$$

$$= \sum_n h(n)\langle x; \varphi_{(m-1,2k+n)} \rangle \quad (5.54)$$

$$= \sum_q \tilde{h}(2k-q)\langle x; \varphi_{(m-1,q)} \rangle \quad (5.55)$$

En posant $q = 2k + n$ et avec $\tilde{h}(n) = h(-n)$:

$$a_k^m = \sum_q \tilde{h}(2k-q)a_q^{m-1} \quad (5.56)$$

On a un raisonnement similaire pour les fonctions d'ondelette, avec :

$$\Psi(t) = \sum_n \sqrt{2}g(n)\varphi_{(-1,n)}(t) \quad (5.57)$$

$$= \sqrt{2} \sum_n g(n)\varphi(2t-n) \quad (5.58)$$

qui est l'équation d'ondelette sur les fonctions d'échelle. On obtient aussi les coefficient de détail ($W_m \in W_{m-1}$) :

$$d_k^m = \sum_n g(n) \langle x; \Psi_{(m,k)} \rangle \quad (5.59)$$

$$= \sum_n g(n) \langle x; \Psi_{(m-1,2k+n)} \rangle \quad (5.60)$$

$= \sum_q \tilde{h}(2k-q) a_q^{m-1}$ (5.61) avec $\tilde{g}(n) = g(-n)$. On peut faire comme remarque que les données de départ sont le signal lui-même.

Le schéma de la figure 5.20 résume l'algorithme d'analyse.

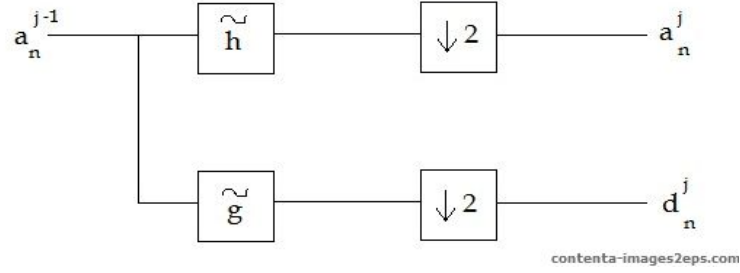


FIGURE 5.20 – Schéma de l'algorithme d'analyse de Mallat

Algorithme de reconstruction

On a vu que :

$$A_{m-1}x = A_m x + D_m x \quad (5.62)$$

$= \sum_n a_n^m \varphi_{(m,n)} + \sum_n d_n^m \Psi_{(m,n)}$ (5.63) Or, A_m est un projecteur. Il a notamment la propriété suivante :

$$A_m(A_m x) = A_m x \quad (5.64)$$

On peut donc écrire :

$$A_{m-1}x = \sum_n \langle A_{m-1}x; \varphi_{(m-1,n)} \rangle \varphi_{(m-1,n)} \quad (5.65)$$

$$= \sum_n a_n^{m-1} \varphi_{(m-1,n)} \quad (5.66)$$

Ainsi :

$$a_p^{m-1} = \langle A_{m-1}x; \varphi_{(m-1,p)} \rangle \quad (5.67)$$

$$= \langle \sum_n a_n^m \varphi_{(m,n)} + \sum_n d_n^m \Psi_{(m,n)}; \varphi_{(m-1,p)} \rangle \quad (5.68)$$

$$= \sum_n a_n^m \langle \varphi_{(m,n)}; \varphi_{(m-1,p)} \rangle + \sum_n d_n^m \langle \Psi_{(m,n)}; \varphi_{(m-1,p)} \rangle \quad (5.69)$$

Or, $\varphi_{(m,n)} = \sum_l h(l) \varphi_{(m-1,l+2n)}$:

$$\langle \varphi_{(m,n)}; \varphi_{(m-1,p)} \rangle = \sum_l h(l) \langle \varphi_{(m-1,l+2n)}; \varphi_{(m-1,p)} \rangle \quad (5.70)$$

$$= \sum_l h(l) \delta_{(l+2n,p)} = h(p-2n) \quad (5.71)$$

On montre aussi que :

$$\langle \Psi_{m,n}; \varphi_{(m-1,p)} \rangle = g(p - 2n) \quad (5.72)$$

On a alors :

$$A_p^{m-1} = \sum_n a_n^m h(p - 2n) + \sum_n d_n^m g(p - 2n) \quad (5.73)$$

Pour pouvoir trouver a_n^{m-1} , il nous faut intercaler entre chaque coefficient un zéro. Le schéma explicatif de l'algorithme de reconstruction est représenté par la figure 5.21.

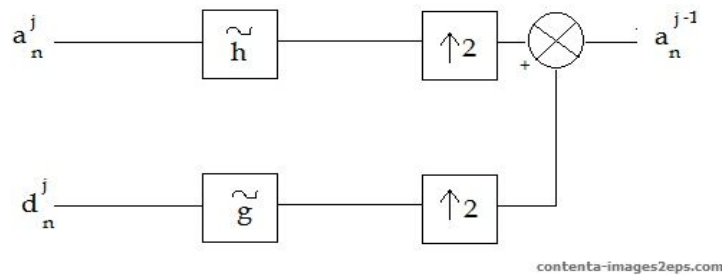


FIGURE 5.21 – Schéma de l'algorithme de reconstruction de Mallat

Conditions sur les filtres

Elles sont au nombre de trois :

1. Caractéristiques d'un filtre passe-haut

$$\sum_n g(n) = 0 \quad (5.74)$$

2. Caractéristiques d'un filtre passe-bas normalisé

$$\sum_n h(n) = \sqrt{2} \quad (5.75)$$

3. Conditions d'orthonormalité

$$\sum_k h(2n - k) \tilde{g}(2m - k) = 0 \quad (5.76)$$

$$\sum_k \left(\tilde{h}(2k - n) h(2k - m) + \tilde{g}(2k - n) g(2k - m) \right) = \delta(n - m) \quad (5.77)$$

5.7.3 Splines de régression

Splines cubiques naturelles

Les splines sont constituées de polynômes par morceaux. Ces polynômes peuvent présenter un mauvais comportement entre le premier et le dernier noeuds. Il n'y a pas de problème de contraintes pour les noeuds se trouvant

entre le premier et le dernier. Les splines cubiques naturelles contournent ce problème en imposant des contraintes supplémentaires qui consistent à dire que la fonction spline est linéaire au-delà des noeuds qui nous posent problème. Cela signifie que les dérivées seconde et tertiaire sont nulles dans ces régions ($\beta_1 = 0, \beta_2 = 0, \sum_{k=1}^K \beta_{k+2} = 0, \sum_{k+1}^K \xi_k \beta_{k+2} = 0$). Ainsi, la spline cubique naturelle s'écrit de la manière suivante :

$$f(x_i) = \sum_{j=1}^{K+2} \beta_j h_j(x_i) \quad (5.78)$$

où la base de puissance tronquée $h_j(x_j)$ est définie comme suit :

$$\begin{aligned} - h_j(x) &= x_i^{j-1}, j = 1, 2 \\ - h_{M+k}(x_i) &= d_k(x_i) - d_{K-1}(x_i), k = 1, \dots, K-2 \end{aligned}$$

avec :

$$d_k(x_i) = \frac{(x_i - \xi_k)_+^3 - (x_i - \xi_K)_+^3}{\xi_K - \xi_k} \quad (5.79)$$

$\beta = (\beta_1, \dots, \beta_{K+2})^T$ étant le vecteur des coefficients de la spline.

Splines cubiques avec contraintes

Quand on modélise par splines, on peut rencontrer des problèmes à cause de la minimisation de l'erreur quadratique sachant que l'espace des fonctions inclut toutes fonctions $f(x_i)$ ayant deux dérivées continues même celles interpolant les données. Les splines cubiques avec contraintes traitent ce problème par la minimisation d'une pénalisation de l'erreur quadratique. Le critère optimisé dans ce cas là peut être écrit comme suit :

$$C(f, \lambda) = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2 + \int (f''(u))^2 du \quad (5.80)$$

où $\lambda \int (f''(u))^2 du$ est la contrainte connue sous le nom de pénalité de rugosité. Cette pénalité a deux partie. Le paramètre λ fait référence à un paramètre de lissage qui contrôle directement le poids donné à la mesure de la dérivée seconde de $f(x)$. Cette intégrale mesure la courbure de la fonction construite. Quand λ décroît, on interpole les données. Quand il augmente, le résultat est une courbe lissée. Pour $\lambda = 0$ (il n'y a pas de contrainte), les fonctions f contiennent des fonctions deux fois dérivables qui passent par tous les points (x_i, y_i) . Quand $\lambda = \infty$, le nombre de degré de liberté est de 2 et on a une courbe linéaire $f(x_i) = \beta_1 + \beta_2 x_i$. Le critère d'optimisation s'écrit alors :

$$C(f, \lambda) = (\mathbf{y} - \mathbf{X}\beta)^T (\mathbf{y} - \mathbf{X}\beta) + \lambda \beta^T \mathbf{\Omega} \beta \quad (5.81)$$

où \mathbf{X} est la matrice de régression pour les splines ordinales et $\mathbf{\Omega}_{ij} = \int h_j''(u) h_k''(u) du$ pour $i = 1, \dots, n$ et $j = 1, \dots, K + M$, M étant l'ordre de la spline. La solution de ce problème prend la forme d'une régression à la chaîne généralisée [hastie, Tibshirani and Freidman (2009)] :

$$\hat{\beta} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X} + \lambda \mathbf{\Omega})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (5.82)$$

Alors la courbe de la spline de lissage est :

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{X}\hat{\boldsymbol{\beta}} = \mathbf{S}_\lambda \mathbf{y} \quad (5.83)$$

avec $\mathbf{S}_\lambda = (\mathbf{X}^T \mathbf{X} + \lambda \boldsymbol{\Omega})^{-1} \mathbf{X}^T$, plus connue sous le nom de matrice de lissage.

B-splines

Pour les splines, les colonnes de la matrice de régression \mathbf{X} ont tendance à être très corrélées puisque chaque colonne est une version transformée de \mathbf{x} . Cette collinéarité peut résulter en une matrice non singulière. Les B-splines permettent, grâce à des calculs efficaces, d'obtenir une forme de matrice de régression par blocs. Une B-spline d'ordre m peut être représentée comme suit :

$$f(x_i) = \sum_{j=1}^{L=K+M} \beta_j B_{j,M}(x_i), x_i \in [\tau_j, \tau_{j+M}] \quad (5.84)$$

Ainsi, chaque B-spline d'ordre M est une polynôme par morceaux de degré $p = M - 1$ qui a un support fini sur $[\tau_j, \tau_{j+M}]$ et zéro sinon.

Construction des B-splines

Pour chaque séquence de noeuds $\xi_0, \xi_1, \dots, \xi_{K+1}$ (ξ_0 et ξ_{K+1} sont les deux bornes de x), si on définit la séquence de noeud augmentée τ telle que :

- $\tau_1 \leq \tau_2 \leq \dots \leq \tau_M \leq \xi_0$;
- $\tau_{M+k} = \xi_k, k = 1, \dots, K$;
- $\xi_{K+1} \leq \tau_{K+M+1} \leq \tau_{K+M+2} \leq \dots \leq \tau_{K+2M}$.

Ces valeurs actuelles de l'ajout de ces noeuds au-delà de la frontière sont arbitraires et il est coutume de les faire tous identiques et égaux à ξ_0 et ξ_{K+1} respectivement.

Notons par $B_{j,M}(x)$ la $j^{ième}$ fonction de base B-spline d'ordre M pour la séquence de noeuds :

$$\tau_1 \leq \tau_2 \leq \dots \leq \tau_M \leq \xi_0 < \xi_1 < \dots < \xi_K < \xi_{K+1} \leq \tau_{K+M+1} \leq \dots \leq \tau_{K+2M}. \quad (5.85)$$

Ces fonctions de base sont définies récursivement comme suit :

- $B_{j,1}(x_i) = \mathbf{1}_{[\tau_j, \tau_{j+1}]} \forall j = 1, \dots, K + 2M - 1$;
- $B_{j,1}(x_i) = \frac{x_i - \tau_j}{\tau_{j+M-1} - \tau_j} B_{j,M-1}(x_i) + \frac{\tau_{j+M} - x_i}{\tau_{j+M} - \tau_{j+1}} B_{j+1,M-1}(x_i), \forall j = 1, \dots, K + M$;

Pour le modèle de régression des B-splines, chaque ligne de la matrice de régression \mathbf{X} de dimension $n \times (M + K)$ où $\mathbf{X}_{i,j} = B_{j,M}(x_i)$ est construite de la manière suivante :

$$\mathbf{X}_i = [B_{1,M}(x_i), B_{2,M}(x_i), \dots, B_{M+K,M}(x_i)] \quad (5.86)$$

Chapitre 6

Identification visuelle de cétacés : perspectives sur la photo-identification automatique

6.1 Méthodes de similarité appliquées à des jeux de données

6.1.1 Alignement Dynamique

L'alignement dynamique (cf [25]) est une technique bien connue pour trouver un alignement spatial entre deux séquences données sous certaines conditions. Ces séquences n'ont pas forcément la même longueur. Elles sont déformées de façon non-linéaire pour s'harmoniser avec l'autre. Cette technique est très utilisée dans le domaine de la reconnaissance automatique de la parole. Ainsi, l'alignement dynamique va nous permettre de les comparer.

Soient deux séquences $X := (x_1, \dots, x_N)$ pour $N \in \mathbb{N}$ et $Y := (y_1, \dots, y_M)$ pour $M \in \mathbb{M}$. Ces séquences sont des signaux discrets ou plus généralement des séquences caractéristiques échantillonnées à intervalle régulier. On définit l'espace caractéristique \mathcal{F} tel que :

$$x_n, y_m \in \mathcal{F} \text{ pour } n \in [1, \dots, N] \text{ et } m \in [1, \dots, M] \quad (6.1)$$

Pour comparer deux caractéristiques différentes, $x, y \in \mathcal{F}$, on a besoin d'une *mesure locale du coût* ou encore d'une *mesure locale de distance*, définie comme la fonction suivante :

$$c : \mathcal{F} \times \mathcal{F} \rightarrow \mathbb{R}_{\leq 0} \quad (6.2)$$

On a deux cas de figures :

- $c(x, y)$ est petit (faible coût) si x et y sont similaires l'un et l'autre.
- $c(x, y)$ est grand (coût important)

Evaluer la mesure locale du coût de chaque paire d'éléments des séquences X et Y , revient à définir la matrice des coûts $C \in \mathbb{R}^{N \times M}$ vue comme :

$$C(n, m) := c(x_n, y_m) \quad (6.3)$$

Puis le but est de trouver un alignement entre X et Y ayant un coût global minimal. Intuitivement, un alignement optimal passe par une vallée de faible coût dans la matrice de coût C .

Définition : Une courbe $(N \times M)$ déformée est une séquence $p = (p_1, \dots, p_L)$ avec $p_l = (n_l, m_l) \in [1 : N] \times [1 : M]$ pour $l \in [1 : L]$, satisfaisant les trois conditions suivantes :

1. Condition de frontière : $p_1 = (1, 1)$ et $p_L = (N, M)$.
2. Condition de monotonie : $n_1 \leq n_2 \leq \dots \leq n_L$ et $m_1 \leq m_2 \leq \dots \leq m_L$.
3. Conditionnement de taille : $p_{l+1} - p_l \in (1, 0), (0, 1), (1, 1)$ pour $l \in [1 : L - 1]$.

La condition de frontière renforce que les premiers éléments de X et Y aussi bien que leurs derniers éléments sont alignés les uns aux autres. La condition de monotonie reflète le besoin d'un chronométrage fidèle. La dernière condition exprime un lien de continuité : aucun élément de X et Y ne peut être omis et il n'y a pas de répliquions dans l'alignement.

Une fois que nous avons nos courbes alignées, il nous suffit de calculer la distance entre elles afin de voir si elles sont proches ou pas. On peut alors calculer un coût minimal entre les deux courbes, donnée par :

$$c_p(X, Y) = \sum_{l=1}^L c(x_{n_l}, y_{m_l}) \quad (6.4)$$

De plus, une courbe déformée optimale entre X et Y est une courbe p^* ayant un coût total minimal par rapport à tous les trajets déformés possibles. La distance DTW, notée $DTW(X, Y)$ entre X et Y est définie comme le coût total de p^* :

$$DTW(X, Y) := c_{p^*}(X, Y) \quad (6.5)$$

$$= \min c_p(X, Y) \text{ } p \text{ est un trajet } (N, M) \text{ de forme } (6.6)$$

Remarques :

1. La distance DTW est bien définie alors qu'il y a de nombreux trajets déformés pour un coût total minimal.
2. Il est facile de voir que la distance DTW est symétrique dans le cas où la mesure locale du coût est symétrique (matrice).
3. D'autre part, la distance DTW n'est pas forcément positive, cela dépend seulement de c .
4. De plus, la distance DTW ne satisfait pas l'inégalité triangulaire, mais seulement dans le cas de c symétrique.

$D(n, m)$ définit une matrice, qui fait référence à la matrice des coûts accumulés. On a $D(N, M) = DTW(X, Y)$.

Théorème : La matrice des coûts accumulés D satisfait les identités suivantes :

- $D(n, 1) = \sum_{k=1}^n c(x_k, y_1)$ pour $n \in [1 : N]$
- $D(1, m) = \sum_{k=1}^m c(x_1, y_k)$ pour $m \in [1 : M]$
- $D(n, m) = \min D(n-1, m-1), D(n-1, m), D(n, m-1) + c(x_n, y_m)$
pour $1 \leq n \leq N$ et $1 \leq m \leq M$

En particulier $DTW(X, Y) = D(N, M)$.

L'initialisation est simplifiée par l'ajout dans la matrice D d'une ligne et d'une colonne supplémentaires qui sont fixées : $D(n, 0) := \infty$ pour $n \in [1 : N]$, $D(0, m) := \infty$ pour $m \in [1 : M]$ et $D(0, 0) := 0$.

Voici les étapes de l'algorithme du calcul de la courbe déformée optimale :

Entrée : Matrice de coûts accumulés D .

Sortie : Trajet déformé optimal p^* .

Procédure : Le trajet optimal $p^* = (p_1, \dots, p_L)$ est calculé en inversant l'ordre des indices de départ avec $p_L = (N, M)$. On suppose que $p_l = (n, m)$ a été calculé. Dans le cas où $(n, m) = (1, 1)$, on doit avoir $l = 1$ et on a alors fini. Autrement :

$$\min p_{l-1} = \begin{cases} (1, m-1) \text{ si } n = 1 \\ (n-1, 1) \text{ si } m = 1 \\ \arg \min D(n-1, m-1), D(n-1, m), D(n, m-1) \end{cases} \quad (6.7)$$

On prend la plus petite paire lexico-graphiquement dans le cas où "argmin" n'est pas unique.

L'intérêt est de calculer des distances entre les courbes de profil obtenus ou encore les modèles et ce, afin de montrer quels sont les profils les plus proches. Grâce à l'alignement dynamique, on peut observer si deux profils sont identiques ou pas et ensuite, calculer leur distance.

6.1.2 Similarité appliquée à l'espace des paramètres

Pour montrer que deux signaux ont plus ou moins de similarités, on utilise le principe de l'intercorrélation. L'intercorrélation vise à extraire le taux de ressemblance entre deux signaux unidimensionnels (les signaux temporels par exemple) ou encore les signaux bidimensionnels (comme les images). La définition mathématique de l'intercorrélation est :

$$Corr(s, s')(t) = \sum_{i=-N}^N s_i s'_{i-t} \quad (6.8)$$

Un cas particulier de l'intercorrélation est l'autocorrélation. Il s'agit de l'intercorrélation entre un signal et lui même.

Dans le cadre de notre étude, nous avons cherché à savoir quels sont les signaux les plus proches. Pour cela, nous pouvons comparer les coefficients des différentes courbes obtenues par les modèles de régression. Afin de savoir si on a

une bonne similitude, on peut calculer la matrice des coefficients de qualité du modèle de régression employé. Les coefficients de corrélation constituant cette matrice, sont définis par :

$$q = \frac{\sum (X_i - E[X_i]) \cdot (X_j - E[X_j])}{\sqrt{\sum (X_i - E[X_i])^2} \times \sqrt{\sum (X_j - E[X_j])^2}} \quad (6.9)$$

Ce coefficient est compris entre -1 et +1 avec :

r = +1 corrélation positive parfaite

r = 0 absence totale de corrélation

r = -1 corrélation négative parfaite

Remarques :

Le coefficient de corrélation nous donne des informations sur l'existence d'une relation linéaire entre les deux grandeurs considérées.

Un coefficient de corrélation nul ne signifie pas l'absence de toute relation entre les deux grandeurs. Il peut exister une relation non linéaire entre elles.

Il ne faut pas confondre corrélation et relation causale : une bonne corrélation entre deux grandeurs peut révéler une relation de cause à effet entre elles, mais pas nécessairement.

6.2 Résultats de la mesure de similarité appliquée aux profils et à leurs approximations

Pour réaliser ce travail, nous avons sélectionné une dizaine d'individus représentés par 3 images chacun. Pour mesurer cette similarité, nous allons tout d'abord utiliser la technique de l'alignement dynamique, puis dans un second temps, nous comparerons les coefficients des splines. Les noms des différentes images nous indiquent tout d'abord l'orientation de l'aileron (G / D). Ensuite, on trouve des initiales comme FR / RV / Ag / lev / PC, qui correspondent au lieu où a été prise la photo. Dans la nomination des images, on trouve la date, l'année ainsi que le numéro de la prise. Sur certains noms reconnaissables, le lieu de la photo apparaît concrètement (Frioul / Ajaccio). Il s'ensuit des initiales telles que ABn / FDU / SDu / EDu qui correspondent aux initiales de la personne qui a pris la photo. Les individus sont donc reconnaissables par un numéro qui leur est propre.

6.2.1 Méthode de l'alignement dynamique

On utilise la méthode de l'alignement dynamique pour calculer les distances entre les différents types de profils d'ailerons obtenus. On va tout d'abord comparer les profils obtenus à partir des coordonnées polaires. Voici deux exemples montrant la mise en application de l'alignement dynamique (figure 6.1 et 6.2). Sur ces deux figures, les deux profils appartiennent au même individu. Le profil

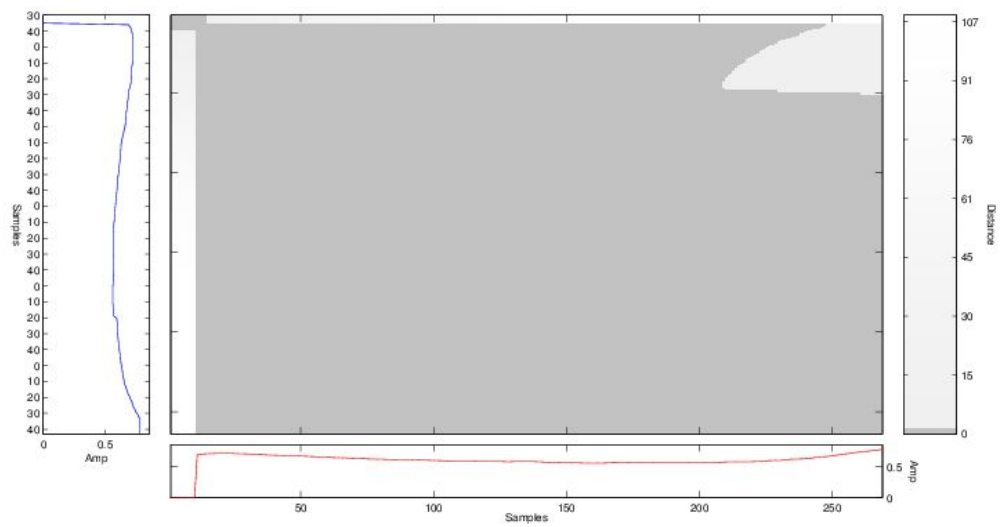


FIGURE 6.1 – Matrice des similitudes entre les deux signaux

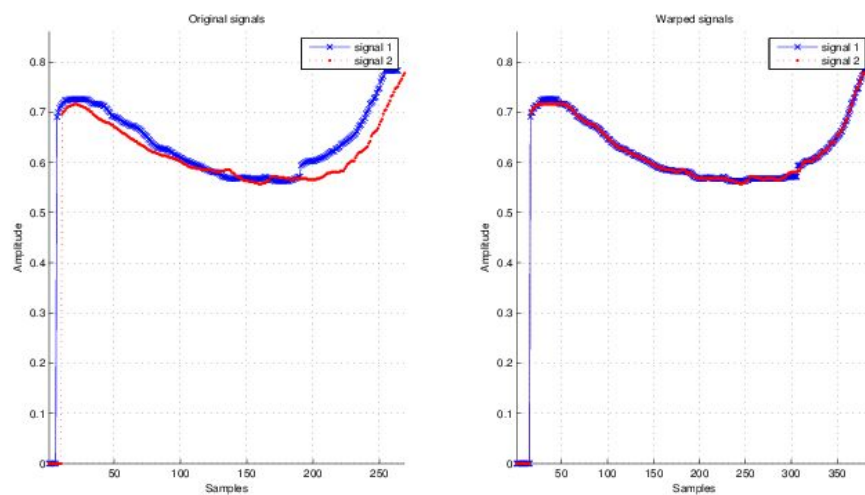


FIGURE 6.2 – Comparaison des deux signaux (gauche - forme initiale, droite - signaux déformés)

déformé 'colle' au profil initial. La distance entre eux deux est de très petite valeur 10^{-5} . Pour le second exemple (cf figures 6.3 et 6.4), les deux profils sont différents donc il s'agit de deux individus distincts. Ce constat se voit aussi sur le second graphe. La distance entre ces deux profils est de 0,0011.

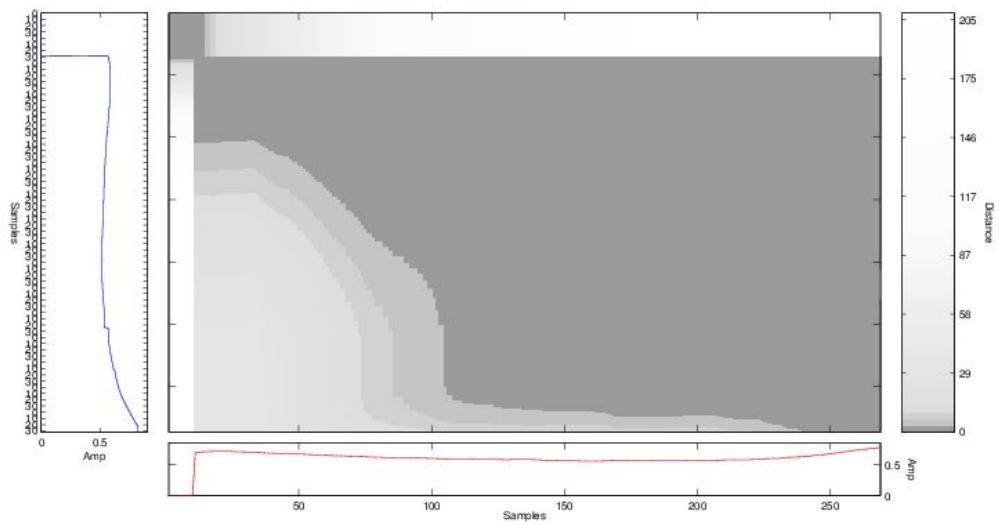


FIGURE 6.3 – Matrice des similitudes entre les deux signaux

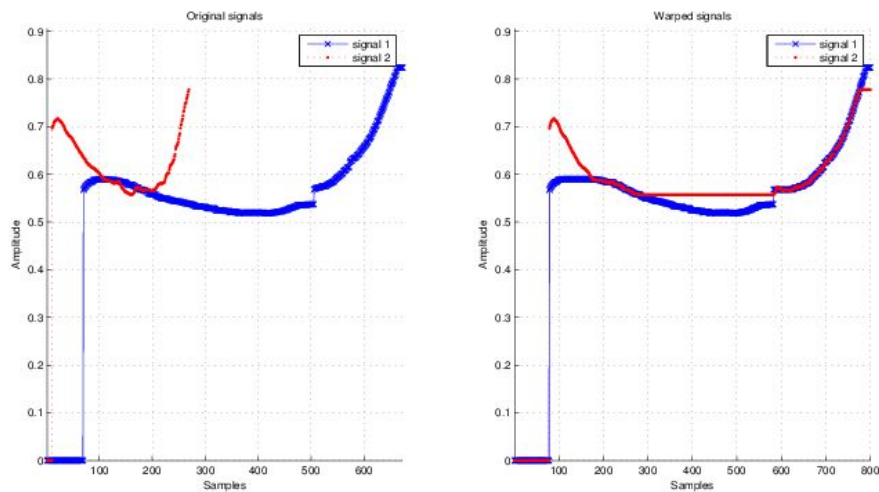


FIGURE 6.4 – Comparaison des deux signaux (gauche - forme initiale, droite - signaux déformés)

6.2.2 Comparaison des méthodes de l'alignement dynamique et des similitudes des paramètres : matrices de confusion

Dans cette partie, nous allons comparer les deux méthodes décrites ci-dessus, à savoir l'alignement dynamique ainsi que la similitude des paramètres. Nous avons appliqué ces deux techniques sur douze individus sélectionnés suivant les critères décrits dans l'introduction. Les photos de ces individus se trouvent en **Annexe**. Pour faciliter la lecture, ils sont rangés par numéro (figure 6.8). La

première méthode consiste à comparer les distances entre les vecteurs représentant les individus, la seconde méthode compare les coefficients des polynômes obtenus par la régression. Les matrices obtenues ont donc pour nombre de ligne et pour nombre de colonne le nombre d'images représentant les individus. Voici les images sur lesquels nous avons effectué nos calculs :

Numéro de l'individu Image correspondante (cf Annexe)
1 <i>G_FR - 29_Frioul_2011_0310_FDh_292_FR - 29</i>
2 <i>G_PC - 29_Frioul_2011_0310_ABn_0391_x_PC - 29</i>
3 <i>G_PC - 29_PCJMB280605_039</i>
4 <i>G_RV - 37_Frioul_2011_0310_ABn_0529_RV - 37</i>
5 <i>D_RV - 37_Frioul_2011_0310_FDh_604_RV - 37</i>
6 <i>D_PC - 31_PCJMB280605_056</i>
7 <i>D_PC - 31_PCPC280605_0240</i>
8 <i>D_GAL - 81_SF_280407 - DB_0380</i>
9 <i>D_GAL - 81_SF_280407 - DB_0392</i>
10 <i>G_PC - 03_PCJMB280605_026</i>
11 <i>D_Ag - U_070424_17h_Revellata_SDu_448_03</i>
12 <i>D_CALVI - 03_070424_17h_Revellata_SDu_488</i>

FIGURE 6.5 – Numérotation des individus utilisés pour effectuer les mesures de similitudes sur les paramètres

Dans ces images, il y a cinq individus. Les images correspondant aux individus sont (6.9) :

Les deux matrices de confusions obtenues pour les deux méthodes (6.7 et 6.8) sont :

Pour la première méthode on remarque tout d'abord que la diagonale est nulle (ce qui est normal). La matrice des distance reconnaît parfaitement les images correspondant à l'individu C et E. Pour les individus A et D, l'identification est relativement bonne (distance inférieure à 0.01 sur l'échelle du graphe). Cepen-

Individu	Numéro de l'image
A	1, 2, 3
B	4, 5
C	6, 7
D	8, 9, 10
E	11, 12

FIGURE 6.6 – Répartition des individus

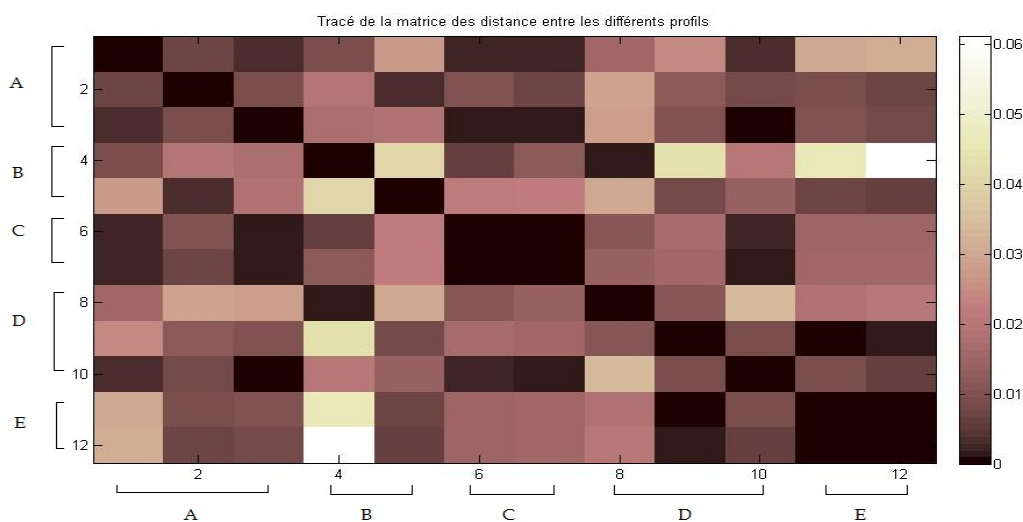


FIGURE 6.7 – Représentation de la matrice des distances appliquée sur nos 12 images. Plus la distance est petite (proche de 0), plus les individus sont proches

nant, on constate que les individus C, D et A sont confondus ainsi que les individus D et E.

Pour la deuxième méthode, on constate que les images correspondant aux mêmes individus n'ont pour la grande majorité, aucune corrélation, à l'exception des images 1 et 3 de l'individu A. Ensuite, la matrice nous indique des images qui sont identiques alors qu'elles ne correspondent pas au même individu (C avec A et B, E avec A, B et C).

Les deux méthodes employées nous montrent : tout d'abord, pour la méthode de l'alignement dynamique, la matrice obtenue nous indique bien quelles sont les images qui appartiennent à un individu donné. La lecture de la matrice est relativement simple : les individus identiques sont ceux pour lesquels la distance vaut soit 0 soit est très proche de 0. Pour la deuxième méthode, la lecture de la matrice est moins évidente. On lit les coefficients qui sont soit proches de 1 ou valant 1. Cependant, sur les deux matrices, on peut constater des erreurs d'identification similaires entre tous les individus, notamment entre les individus E et D, B et D, C avec A et D.

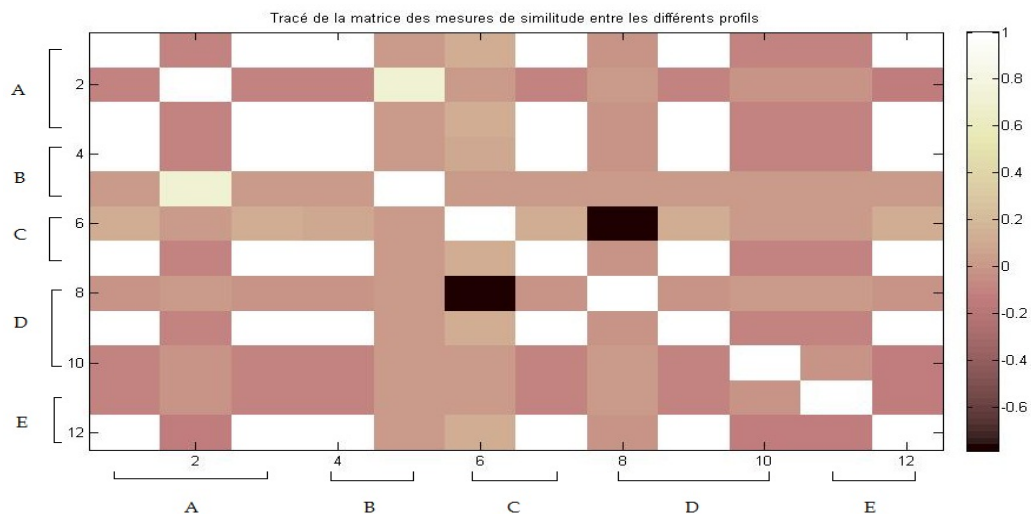


FIGURE 6.8 – Représentation de la matrice des coefficients de corrélation appliquée sur nos 12 images. Plus le coefficients de corrélation est proche de 1, plus la similitude est grande.

Ces erreurs pourraient provenir de notre mise en fonction des données, lors du passage en coordonnées polaires. En effet, il y a à ce moment là, une atténuation d'une partie des courbures qui nous permettent d'identifier l'individu visuellement. Certaines images présentent des courbures plus ou moins importantes, ce qui au moment du passage en coordonnées polaires provoque une atténuation dans le profil au final et donc, une sensation de grande similarité entre tous les individus.

Les deux méthodes peuvent être employées de manière complémentaire. Celle de la comparaison des coefficients de corrélation reste à améliorer car elle permet de travailler directement sur les coefficients du modèle de régression établie. Il nous faut donc travailler sur une mise en fonction correcte de nos profils d'aileron.

6.3 Conclusion

Le programme que nous avons réalisé durant cette étude permet d'extraire puis d'analyser les ailerons des dauphins. Il devait être automatique, ce qui n'est pas encore le cas. En effet, on utilise une fonction de sélection de zone à traiter de manière manuelle, ce qui permet aussi d'enlever toute une zone qui pourrait nous gêner. Cette commande manuelle est essentielle car toutes les images n'ont pas la même dimension.

D'autre part, les techniques de segmentation pourraient être améliorées. Notamment, il existe d'autres méthodes qui sont très efficaces (cf [3], [22], [27]). Pour certaines, on détecte le contour sur l'image elle-même ([22]). On peut aussi,

extraire le contour d'un objet fermé ([3]) ou encore, détecter un contour dans sa globalité, à l'aide des splines cubiques ou de lissage ([27]). Ces techniques pourraient palier au problème qui est d'obtenir une mise en fonction du profil d'aileron parfaite. En effet, La mise en fonction par les coordonnées polaires gomme des détails qui ont leur importance, comme nous avons pu le voir au moment de l'identification des individus.

Grâce à la régression par splines, on peut réaliser de bonnes estimations de profils qui sont très fidèles au modèle d'origine. Les techniques de mesures de similarité nous ont montré que le travail effectué sur les paramètres se révélait précieux. En effet, nous avons obtenu des vecteurs de différentes longueurs et comme la méthode de l'alignement dynamique s'est révélée inefficace, seuls les paramètres peuvent être exploités. A noter que les analyses de textures seraient très complémentaires de notre analyse robuste aux variations d'éclairage (la texture étant sensible aussi à l'orientation Gauche versus Droite)

Le travail réalisé montre la pertinence des méthodes de régression ainsi que l'importance des méthodes d'extraction des données. Nous voyons dans le résumé des distances (figure 6.9) que les similarités apparaissent mais toutefois, des faux positifs persistent et nos travaux continuent actuellement sur ce problème.

6.4 Annexe

6.4.1 Images utilisées pour réaliser l'identification visuelle

Les images utilisées pour réaliser les mesures de similarités. Elles sont rangées par ordre d'apparition de l'individu.

Individu	Numéro de l'image
A	trois photos
B	deux photos
C	deux photos
D	deux photos
E	trois photos

FIGURE 6.9 – Répartition des individus



FIGURE 6.10 – Image 1 de l'individu A



FIGURE 6.11 – Image 2 de l'individu A



FIGURE 6.12 – Image 3 de l'individu A



FIGURE 6.13 – Image 1 de l'individu B



FIGURE 6.14 – Image 2 de l'individu B



FIGURE 6.15 – Image 1 de l'individu C



FIGURE 6.16 – Image 2 de l'individu C



FIGURE 6.17 – Image 1 de l'individu D



FIGURE 6.18 – Image 2 de l'individu D



FIGURE 6.19 – Image 3 de l'individu D



FIGURE 6.20 – Image 1 de l'individu E



FIGURE 6.21 – Image 2 de l'individu E

Chapitre 7

Conclusion générale

Ce projet présente une première génération de méthodes automatiques permettant de détecter et d'identifier, soit par acoustique soit par photographie, différentes espèces de cétacés, comme les dauphins et les cachalots. Certaines d'entre elles fonctionnent déjà sans aucune supervision, et sont prêtes à être installées pour une surveillance en continu, d'autres en sont encore à un stade où elles ont besoin de l'intervention de l'homme, mais la suite du projet visera à les rendre autonomes. En particulier, un algorithme de tri automatique des ailerons de dauphins reste à mettre en place.

Les résultats de ces analyses automatiques peuvent contribuer au recensement des cétacés présents dans les zones étudiées et alimenter des modèles de suivi de populations. Il est ainsi possible de suivre les lieux fréquentés par les différentes espèces au cours du temps et de mettre en évidence d'éventuels pics de fréquentation (hot-spots) pour certaines d'entre elles sur certaines périodes.

Le LSIS et le sanctuaire PELAGOS ont des points d'intérêt qui convergent, à la fois d'un point de vue géographique et d'un point de vue scientifique. Ils se rejoignent en particulier sur la problématique des méthodes performantes de suivi des populations de mammifères marins, pour qui la détection visuelle est insuffisante (Dauphin bleu et blanc, Dauphin de Risso, Grand dauphin, Rorqual commun, et Cachalot au large de Toulon, et autour des îles d'Hyères par exemple). Leur collaboration permet de confronter des modèles automatiques à des données réelles à grande échelle pour améliorer la qualité des analyses et des résultats.

Au niveau acoustique, le système DECAV est embarqué depuis quelques années sur les navires d'observation visuelle pour procéder à un transect acoustique par quelques minutes d'enregistrements en différents points du transect visuel actuel du PNPC. Les réponses du système permettent (1) de déterminer dans la zone donnée la présence ou non d'un cétacés d'intérêt pour la mission (la détection acoustique est 4 fois plus fréquente que la détection visuelle), ce qui permet de rester sur zone pour tenter une prise de vue photographique, ou de passer à un autre secteur ; et (2) pour la première fois, d'estimer in situ la taille des cachalots enregistrés. Ces données permettront par la suite de déterminer la répartition spatiale des animaux par espèce, et par taille pour les cachalots

en fonction du temps. Ceci permet aussi de mettre en évidence l'impact des pétardage sur la présence des cétacés. Un site WEB est en cours de mise en place par DYNIS sur l'USTV : il présentera les informations déclarées publiables par PELAGOS, avec des démonstrations et une vitrine pédagogique.

Au niveau photo-identification, les perspectives du LSIS visent l'automatisation totale du tri des photos d'ailerons. L'Agence Française des Aires Marines Protégées a construit un site internet sur lequel l'ensemble des acteurs français qui observent les cétacés peuvent partager leurs photos. Un système de recherche d'images sur le web allant de pair avec la photo-identification automatique, nous avons proposé d'appliquer notre savoir-faire en recherche d'images sur internet pour améliorer ce type de système. D'autre part, les images déjà cataloguées d'ailerons ou caudales formeront des collections disponibles pour apprentissage et amélioration de nos modèles.

Les travaux de recherches développés sont soit déjà publiés ou soumis en conférences internationales [12],[13], soit en colloque francophone (de mammalogie [14]).

7.1 Vers un suivi 3D sous-marin temps-réel des cétacés

Une perspective de nos travaux est la mise en place de bouées acoustiques dans Pelagos pour le suivi en temps-réels de cétacés, notamment dans les zones à fort risque de collision.

Notre savoir faire est mur en la matière, notamment via notre brevet international en suivi par acoustique passive [17, 16], dont des démonstrations sont données sur <http://sabiiod.org>. Nous avons de plus en 2011-12 fait une étude de cas pour installer une transmission WIFI depuis une bouée vers la côte, donc vers notre laboratoire, et calculer / alerter en temps-réel le Parc, et les Marines, de la présence de grands cétacés, et de leur comportements [4]. Des financements sont recherchés, un premier prototype (sans wifi) est mis à l'eau au printemps 2013 (bouée BOMBYX).

La mise en place prochaine de la bouée Bombyx de l'USTV, point fixe d'enregistrement continu entre Toulon et Hyères, apportera de nouvelles perspectives au suivi acoustique des Cétacés. Le partage et le croisement des données acquises par DECAV, Boussole, Bombyx et le Parc National de Port-Cros permettront un suivi beaucoup plus large, à la fois d'un point de vue temporel et spatial, et permettront de déterminer plus précisément les zones de fréquentation et les trajets migratoires des différentes populations de Cétacés.

Notre futur collaboration avec le laboratoire GEOAZUR dans le cadre du projet GROSMARIN exploitant un réseau de capteurs sismiques (accéléromètres et

acoustique basse fréquence) au large de NICE. Notre but est de profiter de cette infrastructure pour collecter des données relatives aux passages de cétacés dans la zone. Une première étude a permis de montrer de possibles traces spectrales de rorquals (voir figure 7.1) et motive de plus amples recherches.

Cette stratégie est à coupler avec la mise en valeur biologique de données astrophysiques, comme dans l'angle est de PELAGOS avec les capteurs ANTARES sur lequel nous cherchons collaboration avec l'IN2P3 [2], ou NEMO avec INFN [7] dans l'angle sud de Pelagos avec une collaboration ouverte depuis deux ans qui montre un suivi efficace des cachalots dans cette zone sud Pelagos par nos algorithmes.

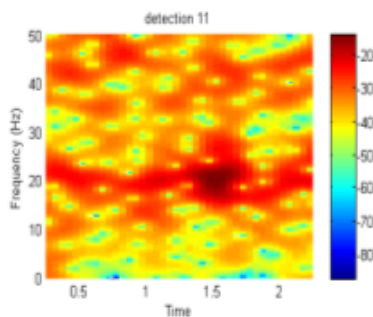


FIGURE 7.1 – Spectrogramme d'une détection d'une émission sonore de rorqual (20Hz pulse) issue du réseau de capteur GROSMARIN

Table des figures

1.1	Hydrophone Cetacean Research C55	6
2.1	Trois différents types d'émissions sonores de dauphin <i>Stenella coeruleoalba</i> . En abscisse, un intervalle de temps de 10 secondes quantifié en secondes (schéma du haut et milieu) puis en bins (schéma du bas). En ordonnées, les fréquences en Hertz de 0 à 48 000Hz (schéma du haut et milieu) puis en bins (schéma du bas).	9
2.2	<i>Stenella coeruleoalba</i> , le dauphin bleu et blanc (îles d'Hyères, 16/09/2011)	10
2.3	<i>Grampus griseus</i> , le dauphin de Risso (îles d'Hyères, 16/09/2011).	10
2.4	Frottement de boudin de Zodiac. En abscisse, un intervalle de temps de 10 secondes quantifié en bins. En ordonnées, les fréquences en Hertz puis en bins.	11
2.5	Démarrage de moteur hors-bord (bateau du Parc national) à 30 mètres de l'hydrophone. En abscisse, un intervalle de temps de 10 secondes quantifié en bins. En ordonnées, les fréquences en Hertz puis en bins.	11
2.6	Signature sonore de l'utilisation d'un "trim" : système permettant de régler l'inclinaison d'un moteur hors bord via un moteur électrique couplé à des vérins hydrauliques.	12
2.7	Allumage de sonar militaire le 20120126 130012	13
2.8	Deux sonars militaires employés simultanément. Le sonar de coque d'un bâtiment militaire ainsi qu'un sonar remorqué à profondeur variable.	13
2.9	Fausse détection dues à un système d'acquisition mal assemblé.	14
2.10	Exemple d'enregistrement ne contenant ni sifflements ni signaux anthropiques susceptibles d'entraîner de fausses détections.	14
2.11	Schématisation de deux paramètres : "dist t" et "dist f".	22
2.12	DECAV 20120126 1041583 dist t = 5 et dist f = 2. Critères de continuité laxistes. De 4 à 10 secondes, un "trim" de hors bord.	22
2.13	DECAV 20120126 1041583 dist t = 1 et dist f = 1. Critères de continuité drastiques.	23
2.14	20120530 0821211 dist t = 5 et dist f = 2. Critères de continuité laxistes.	24
2.15	20120530 0821211 dist t = 1 et dist f = 1. Critères de continuité drastiques.	24
2.16	20120504 0859042 dist t = 5 et dist f = 2. Critères de continuité laxistes.	25

2.17	20120504 0859042 dist t = 1 dist f = 1. Critères de continuité drastiques.	25
2.18	DECAV 20110607 0740373 dist t = 5 et dist f = 2. Critères de continuité laxistes.	26
2.19	20110607 0740373 dist t = 1 et dist f = 1. Critères de continuité drastiques.	26
2.20	20110607 0740375 dist t = 5 et dist f = 2. Critères de continuité laxistes.	27
2.21	20110607 0740375 dist t = 1 et dist f = 1. Critères de continuité drastiques.	27
2.22	Schéma algorithmique du détecteur spectral de voisements de delphinidés programmé sous Matlab.	28
2.23	Spectrogramme de 20 secondes contenant des signaux de delphinidés.	29
2.24	Spectrogramme précédent filtré à 4675 Hz.	30
2.25	Maxima locaux du spectrogramme filtré précédent.	30
2.26	Maxima locaux formant des trajectoires continues. Les maxima locaux isolés ont été exclus.	31
2.27	Trajectoires continues dont la durée et l'accélération moyenne sont respectivement supérieures à 53,3 ms (valeur optimale d'après la courbe COR.) inférieures à 0,5.	32
2.28	Courbe des caractéristiques opérationnelles de réception (Courbe COR) du détecteur spectral de sifflements de dauphins.	34
2.29	Résumé des détections visuelles et acoustiques de cétacés à dents du 06/05/2011 au 11/07/2012. S.c : <i>Stenella coeruleoalba</i> , le dauphin bleu et blanc. C.g : Dauphin de Risso. T.c : <i>Tursiops truncatus</i> , le grand dauphin. Oui : espèce pas encore différenciée acoustiquement. A noter que l'observation visuelle de dauphins n'a pas systématiquement été suivie d'une écoute hydrophonique. Ceci est dommageable pour l'étude de l'espèce et des groupes polyspécifiques relativement fréquents en Méditerranée.	36
2.30	Variations mensuelles des détections acoustiques de delphinidés en 2011.	37
2.31	Sifflement de grand dauphin, <i>Tursiops truncatus</i>	38
2.32	Motif élémentaire en "U"	40
2.33	Motif élémentaire en "antislash"	40
2.34	Motif élémentaire constitué d'une montée puis d'un plateau.	41
2.35	Motif élémentaire "en dôme"	41
2.36	Motif élémentaire serpentiforme	42
2.37	Motif élémentaire "burst"	42
2.38	Liste des motifs élémentaires les plus répandus dans les enregistrements DECAV 2011 et 2012	43
2.39	Spectrogramme temps-fréquence d'un enregistrement réalisé le 06/05/2011 à 09h00	43
2.40	Spectrogramme temps-fréquence d'un enregistrement réalisé le 07/06/2011 à 07h35	44
2.41	Spectrogramme temps-fréquence de 20 secondes le 07/06/2011 à 07h35m55s	45
2.42	Spectrogramme temps-fréquence de 20 secondes le 07/06/2011 à 07h36m15s	46

2.43	Spectrogramme temps-fréquence de 20 secondes le 07/06/2011 à 7h36h35s	46
2.44	Spectrogramme temps-fréquence de 20 secondes le 16/09/2011 à 09h06m01s	47
2.45	Spectrogramme temps-fréquence de 20 secondes le 16/09/2011 à 09h16m05s	47
2.46	Spectrogramme temps-fréquence de 20 secondes le 07/06/2011 à 07h40m37s	48
2.47	Spectrogramme temps-fréquence de 20 secondes le 31/08/2011 à 09h30m54s	49
2.48	Spectrogramme temps-fréquence de 20 secondes le 31/08/2012 à 09h30m54s	49
2.49	Bathymétrie et cartographie des signaux de <i>Stenella coeruleoalba</i> de l'archipel des Stoechades	50
3.1	<i>Physeter macrocephalus</i> , le cachalot (îles d'Hyères, 30/05/2012) . .	52
3.2	Coupe transversale virtuelle de la tête d'un cachalot. Schéma d'origine : Museum of New Zealand Te Papa Tongarewa.	53
3.3	Coupe transversale virtuelle de la tête d'un cachalot montrant les différentes réflexions sonores pour une même impulsion. Schéma d'origine : Museum of New Zealand Te Papa Tongarewa.	53
3.4	Structure d'un clic réel multipulsé.	54
3.5	Exemple de la sortie PNPC du 30 mai 2012 : Voici les mesures temporellement représentés produites par MOVIP des intervalles de temps entre pulses sur un signal de cachalot enregistré pendant 5 minutes dans le canyon des Stoechades à 11h08.	55
3.6	Exemple de la sortie PNPC du 30 mai 2012 : Voici les mesures statistiques produites par MOVIP des intervalles de temps entre pulses sur un signal de cachalot enregistré pendant 5 minutes dans le canyon des Stoechades à 11h08.	55
3.7	Ce tableau résume les résultats obtenus pour chaque sortie en mer. Pour plus d'information se reporter à la page web DECAV donnée précédemment. La valeur avec une astérisque à été trouvée par analyse manuelle. Les différences des tailles sont significatives.	57
3.8	Distribution des tailles de cachalots présents au large de Toulon et de Hyères.	58
3.9	Distribution spatiale des cachalots au cours des 16 premières sorties. Chaque cadre jaune fait figurer la position de l'écoute, le jour de l'enregistrement, le sexe de l'animal ainsi que sa taille. Les cadres jaunes avec une astérisque représentent une position qui est en dehors de l'image.	60
3.10	Carte de l'effort de recherche de cachalots par zones prédéfinies. En vert, les zones où il n'y a pas eu ou très peu de détection - En jaune, les zones de probabilité de détection sont comprises entre 0.25 et 0.5 - En orange, elles sont comprises entre 0.5 et 0.75 - En rouge, les zones ont une probabilité supérieure ou égale à 0.75 - on nomme de les zone de la manière suivante (x,y) - De bas en haut et de gauche à droite : $p(1,1) = 0.5$, $p(1,2) = 1$; $p(2,1) = 0.75$; $p(3,1) = 0$; $p(4,1) = 0.4$, $p(4,2) = 0$; $p(5,1) = 0.33$, $p(5,2) = 0.66$, $p(5,3) = 0.5$	61

3.11	Variations superposées de l'abondance en cachalots détectés lors des sorties en 2011 et en 2012. En bleu l'année 2011 et en rouge l'année 2012.	62
3.12	Distributions temporelles des observations de rorquals et cachalots réalisés par le système REPCET en 2011 [24].	62
4.1	Le bâtiment de surface, base des plongeurs démineurs (BBPD) "Archéron" en opération de pétardage. Source : Marine nationale.	65
4.2	Représentation temps/fréquence des signaux mesurés. En haut : seule l'amorce a explosé. En bas : L'amorce et la mine ont explosés.	67
4.3	Représentation temporelle des signaux mesurés.	68
4.4	Représentation fréquentielle des signaux mesurés (module de fft) lors de l'explosion charge + mine. De haut en bas : bruit de mer avant explosion, bruit de mer + explosion, bruit de mer après explosion.	69
4.5	Comparaison des niveaux d'énergie par bandes de fréquences de 500 hz entre le bruit de mer avant et après la première explosion + comparaison entre le bruit de mer avant la première explosion et le bruit de mer après la deuxième explosion. Niveau avant explosion par rapport à niveau après explosion en dB. Le calcul est effectué sur des portions de 47,5 s.	70
4.6	Niveau d'énergie relatif au niveau de bruit précédent l'explosion (charge + mine).	72
4.7	Niveau d'énergie relatif au niveau de bruit précédent l'explosion (charge + mine). Zoom sur l'instant de l'explosion.	72
4.8	Schématisation de la propagation des ondes sonores lors d'un pétardage.	73
4.9	Effets de différents types de sons anthropogéniques sur les cétacés [6].	76
4.10	Comparaison des sensibilités fréquentielles entre l'Homme, poissons et certaines espèces de mammifères marins [26].	77
4.11	Coefficient d'atténuation fréquentiel selon le modèle de Leroy d'après l'expression donnée ci-dessus.	79
4.12	Profils de célérité typique.	80
4.13	Exemple de trajets multiples en milieu océanique [19].	81
4.14	Profil de célérité et tracé de rayons typiques de la mer Méditerranée. La source est située à une profondeur de 100 mètres et est illustrée par un cercle. On peut remarquer la présence de rayons réfractés (traits pleins), de rayons réfractés et réfléchis en surface (traits hachurés) et de rayons réfractés, réfléchis fond et surface (traits pointillés hachurés) [19].	81
4.15	Exemple de cartes obtenues avec le logiciel PROPAOR dédié aux Iles d'Or.	82
5.1	Figure d'une ondelette	85
5.2	$D_{PQ-01Frioul_2011_0310_ABn_0305xPQ-01FR-03}$	90
5.3	Clustering k-means appliqué à 3 images	91
5.4	FAS appliqué à notre image test pour différents nombres d'itérations N et gains p - à droite N = 25, p = 22, à gauche N = 26, p = 25	92

5.5	Application de l'algorithme multirésolution de Mallat - Application du clustering k-means au résultat	92
5.6	Image du dauphin <i>D_Ag - U07042417hRevellataSDu448_03</i> avec le profil de son enveloppe	94
5.7	Tracé du profil de l'aileton par les coordonnées polaires du dauphin <i>G_Aj-E 070423 galeria SDu 192</i>	95
5.8	<i>G_PC - 29_PCJMB280605_039</i>	95
5.9	Tracé de la régression polynomiale pour différents ordres sur le profil <i>G_PC - 29_PCJMB280605_039</i>	96
5.10	Tracé des résidus pour différents ordres de la régression polynomiale sur le profil <i>G_PC - 29_PCJMB280605_039</i>	96
5.11	Répartition des distances entre les profils et les modèles pour la régression polynomiale d'ordre 4 sur l'ensemble des profils	97
5.12	Répartition des distances entre les profils et les modèles pour la régression polynomiale d'ordre 10 sur l'ensemble des profils	97
5.13	Tracé de la régression par une spline d'ordre 4 et pour différents nombres de noeuds sur le profil <i>G_PC - 29_PCJMB280605_039</i>	98
5.14	Tracés des courbes des résidus liées à la régression par une spline d'ordre 4 et pour différents nombres de noeuds sur le profil <i>G_PC - 29_PCJMB280605_039</i>	99
5.15	Répartition des distances entre les profils et les modèles pour la régression par une spline d'ordre 4 avec 10 noeuds sur l'ensemble des profils	99
5.16	Répartition des distances entre les profils et les modèles pour la régression par une spline d'ordre 4 avec 20 noeuds sur l'ensemble des profils	100
5.17	Tracé de la régression par une B-spline d'ordre 4 avec 10 noeuds sur le profil <i>G_PC - 29_PCJMB280605_039</i>	100
5.18	Tracé de la régression par une B-spline d'ordre 4 avec 20 noeuds sur le profil <i>G_PC - 29_PCJMB280605_039</i>	101
5.19	Tracé du résidu de la régression B-spline sur le profil <i>G_PC - 29_PCJMB280605_039</i>	101
5.20	Schéma de l'algorithme d'analyse de Mallat	104
5.21	Schéma de l'algorithme de reconstruction de Mallat	105
6.1	Matrice des similitudes entre les deux signaux	112
6.2	Comparaison des deux signaux (gauche - forme initiale, droite - signaux déformés)	112
6.3	Matrice des similitudes entre les deux signaux	113
6.4	Comparaison des deux signaux (gauche - forme initiale, droite - signaux déformés)	113
6.5	Numérotation des individus utilisés pour effectuer les mesures de similitudes sur les paramètres	114
6.6	Répartition des individus	115
6.7	Représentation de la matrice des distances appliquée sur nos 12 images. Plus la distance est petite (proche de 0), plus les individus sont proches	115
6.8	Représentation de la matrice des coefficients de corrélation appliquée sur nos 12 images. Plus le coefficients de corrélation est proche de 1, plus la similitude est grande.	116

6.9 Répartition des individus	117
6.10 Image 1 de l'individu A	118
6.11 Image 2 de l'individu A	118
6.12 Image 3 de l'individu A	119
6.13 Image 1 de l'individu B	119
6.14 Image 2 de l'individu B	120
6.15 Image 1 de l'individu C	120
6.16 Image 2 de l'individu C	121
6.17 Image 1 de l'individu D	121
6.18 Image 2 de l'individu D	122
6.19 Image 3 de l'individu D	122
6.20 Image 1 de l'individu E	123
6.21 Image 2 de l'individu E	123
7.1 Spectrogramme d'une détection d'une émission sonore de rorqual (20Hz pulse) issue du réseau de capteur GROSMARIN	126

Bibliographie

- [1] R. ABEILLE, P. GIRAUDET, and H. GLOTIN. A robust and fast bivariate inter-pulse intervals estimator in physeter catodon clicks. In *Fifth International Workshop on Detection, Classification, Localization & Density Estimation of Marine Mammals using Passive Acoustics*, page 10, 22 august 2011.
- [2] O. ADAM and H. GLOTIN. Passive acoustic storey of the antares neutrino detector for real-time cetaceans detection, localization and behavior studies. In I. explorer, editor, *PASSIVE'08*, page 6p, october 2008.
- [3] T. Adamek and N. O'Connor. A multiscale representation method for nonrigid shapes with a single closed contour. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology : Special Issue on Audio and Video Analysis for Multimedia Interactive Services*, 14(5) :742–753, 2004.
- [4] F. BENARD and H. GLOTIN. High level automatic structuration of ocean passive data : from click sequence modulations to whale behavior. In *Int Workshop PASSIVE 08 IEEE*, page 7p, october 2008.
- [5] C. Blomqvist and M. Amundin. *High-Frequency Burst-Pulse Sounds in Agonistic/Aggressive Interactions in Bottlenose Dolphins, Tursiops truncatus*, chapter 60, pages 425–431. The University of Chicago Press, 2004.
- [6] I. Boyd and al. The effects of anthropogenic sound on marine mammals : A draft research strategy. Technical report, European Science Foundation Marine Board, 2008.
- [7] F. B[U+FFFD]ARD, H. GLOTIN, and G. P. Whale 3d monitoring using astrophysic nemo onde two meters wide platform with state optimal filtering by rao-blackwell monte carlo data association. *Journal of Applied Acoustics*, 71 (2010) :994–999, november 2010.
- [8] J. Cavassilas, B. Xerri, and B. Borloz. Filtre adapté stochastique. contribution à la détection de textures bidimensionnelles. pages 491–494. GRETSI, GRoupe d'Études du Traitement du Signal et des Images, 1997.
- [9] F. Chamroukhi. *Hidden process regression for curve modeling, classification and tracking*. Ph.D. thesis, Université de Technologie de Compiègne, Compiègne, France, 2010.
- [10] P. Courmontagne. *Notes de cours : Les ondelettes*. I.S.E.M./L2MP CNRS UMR 6137, 2012.
- [11] C. Deboor. *A Practical Guide to Splines*. Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. K, Dec. 1978.

- [12] Y. Doh and H. Glotin. An inter-frequency attenuation model for the estimation of the source-receptor distance (ifa) on sperm whale clicks. In *Fifth International Workshop on Detection, Classification, Localization & Density Estimation of Marine Mammals using Passive Acoustics*, 2011.
- [13] Y. Doh, H. Glotin, J. Razik, and S. Paris. Estimating the propagation distance for a wideband signal using inter-frequency attenuation : application to the sperm whale, submitted. In *Journal of Acoustic Society of America, Special issue on marine mammals and passive acoustics*, 2012.
- [14] O. DUFOUR, R. ABEILLE, P. GIRAUDET, and H. GLOTIN. Avancées en bioacoustique passive pour le suivi de cétacés. In *Coll. Francophone de Mammalogie : Les mammifères dans les écosystèmes aquatiques*. Ed. DREAL and LPO Provence Alpes Côte AZUR PACA, 35 ieme edition, oct 2012.
- [15] S. C. E. Finneran J. J., Carder D. A. and R. S. H. Temporary threshold shift in bottlenose dolphins (tursiops truncates) exposed to mid-frequency tones. *Journal of the Acoustical Society of America*, 118(4) :2696–2705, october 2005.
- [16] P. GIRAUDET and H. GLOTIN. Real-time 3d tracking of whales by precise and echo-robust tdoas of clicks extracted from 5 bottom-mounted hydrophones records of the autec. *Applied Acoustics*, 67(11–12) :1106–1117, 2006.
- [17] H. GLOTIN, F. BENARD, and P. GIRAUDET. Whales cocktail party : a real-time tracking of multiple whales. *International Journal Canadian Acoustics*, 36(1) :139–145, march 2008. ISSN 0711–6659.
- [18] A. Growcott, B. Miller, P. Sirguy, E. Slooten, and S. Dawson. Measuring body length of male sperm whales from their clicks : the relationship between inter-pulse intervals and photogrammetrically measured lengths. *J Acoust Soc Am*, 130(1) :568–73, 2011.
- [19] N. Josso. *Caractérisation des milieux sous-marins en utilisant des sources mobiles d’opportunité*. PhD thesis, Université de Grenoble, 2010.
- [20] S. M. Kay. *Fundamentals of Statistical Signal Processing : Estimation Theory*. Prentice Hall, 1993.
- [21] C. Leroy. Sound attenuation between 200 and 10000 cps measured along single paths. Technical report, Saclant ASW Research Center, 1965.
- [22] M. Maire, P. Arbelaez, C. Fowlkes, and J. Malik. Using contours to detect and localize junctions in natural images. In *CVPR*. IEEE Computer Society, 2008.
- [23] S. Mallat. *A Wavelet Tour of Signal Processing, Second Edition (Wavelet Analysis & Its Applications)*. Academic Press, 2 edition, Sept. 1999.
- [24] P. Mayol. Bilan des observations repcet 2011 de repérage en temps réel des cétacés. Technical report, Souffleurs d’écume, 2011.
- [25] M. Muller and M. Müller. *Information Retrieval for Music and Motion*. Springer, 2010.
- [26] S. Parvin and al. The environmental effects of low frequency underwater sound. *Proceedings of Undersea Defence Technology 1999*, pages 221–227, 1999.

- [27] F. Precioso. *Parametric active contours for image and video segmentation*. Ph.D. dissertation, Université de Nice Sophia Antipolis, Sophia Antipolis, France, September 2004.
- [28] J.-M. Prévot. Numérisation et traitement de flux audio et audiovisuels - application à la cétologie et la détection d'évènements audio/vidéo. Rapport de Recherche LSIS-DYNI, 2012.
- [29] C. RABOUY. Modélisation de données fonctionnelles : application à la photo-identification de dauphins. Master's thesis, Université du Sud-Toulon Var, Juillet 2012.
- [30] W. J. Richardson and al. In *Marine mammals and noise*. Academic Press, San Diego, CA, 576 pp, 1995.
- [31] S. Ridgway and al. Behavioural responses and temporary shift in masked hearing threshold of bottlenose dolphin (*tursiops truncatus*) to 1-second tones of 141 to 201 db re. 1 μ pa. Technical report, NRAD RDT & RE Div. Naval Command, Control and Ocean Surveillance Center, 1997.
- [32] S. Tatiraju and A. Mehta. Image segmentation using k-means clustering, EM and normalized cuts - Technical report. 2008.
- [33] B. Xerri and B. Borloz. Filtre adapté stochastique sous contrainte. pages 325–328. GRETSI, Groupe d'Études du Traitement du Signal et des Images, 2001.
- [34] F. E. Yelverton J.T., Richmond D.R. and J. R.K. Safe distances from underwater explosions for mammals and birds. Technical report, Lovelace Foundation for Medical Education and Research, 1973.
- [35] J. R. Yelverton J.T., Richmond D.R. and F. E.R. A review of the treatment of underwater blast injuries. Technical report, Lovelace Foundation for Medical Education and Research, 1976.
- [36] W. Zimmer. *Passive Acoustic Monitoring of Cetaceans*. Cambridge University Press, 2011.