

# **Analyses bioacoustiques monophones du cachalot et d'un autre odontocète via l'observatoire neutrino toulonnais : comportements suivant la phase lunaire et le bruit en basse-fréquence**

- Projet PELAGOS DECAN 13-040 -

Nicolas Enfon<sup>1,2,3</sup>, Randall Balestriero<sup>1,2,3</sup>, Ales Mishchenko<sup>1,2,3</sup>,  
Jean-Marc Prévot<sup>3</sup>, Joseph Razik<sup>1,2,3</sup>, Sébastien Paris<sup>1,2,3</sup>, Julie Patris<sup>2</sup>,  
Hervé Glotin<sup>1,2,3,4</sup>

(1) Equipe DYNI, CNRS, UMR LSIS 7296

(2) Aix-Marseille Université, 13397 Marseille, France

(3) Université de Toulon, 83957 La Garde, France

(4) Institut universitaire de France, 75005 Paris, France

Version 1.8

Figures en couverture : *Physeter macrocephalus*, crédit internet, et vue d'artiste du détecteur de neutrino Antares, au large de Toulon <http://antares.in2p3.fr/Gallery/3D/index>

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Résumés</b>	<b>3</b>
1.1	Résumé des objectifs . . . . .	3
1.2	Résumé des résultats . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Introduction</b>	<b>5</b>
2.1	Contexte . . . . .	5
2.2	Remerciements . . . . .	6
2.3	Responsable de l'étude et référence des données . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Corpus</b>	<b>7</b>
3.1	Bases de référence bioacoustique en cétologie . . . . .	7
3.2	Enregistrements de l'observatoire de neutrino Antares . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Rappel sur détection de transitoires d'écholocation</b>	<b>10</b>
4.1	Détecteur dérivé d'un spectrogramme . . . . .	10
4.2	Détecteur dérivé de l'opérateur de Teager-Kaiser . . . . .	11
4.3	Détecteur dérivé du test de Page . . . . .	12
4.4	Définition du détecteur de DECAN . . . . .	12
<b>5</b>	<b>Décomposition en ondelettes appliquée à la détection d'odontocètes</b>	<b>13</b>
5.1	Éléments sur la décomposition en ondelettes . . . . .	14
5.2	Comparaison d'un scalogramme avec un spectrogramme . . . . .	14
5.3	Nouveaux détecteurs d'odontocètes par ondelette . . . . .	17
5.4	Performances des détecteurs . . . . .	19
5.5	Discussion . . . . .	19
<b>6</b>	<b>Identification des espèces détectées</b>	<b>20</b>
6.1	Identification du <i>Physeter macrocephalus</i> . . . . .	20
6.2	Identification de l'autre odontocète ( <i>Sc</i> ) . . . . .	20
<b>7</b>	<b>Extraction de comportement des cétacés par bioacoustique</b>	<b>21</b>
7.1	Variation d'activité au cours de la période d'étude . . . . .	21
7.2	Variation d'activité au cours d'une journée . . . . .	22
7.3	Variation de l'activité acoustique suivant les bruits basse-fréquence . . . . .	22
7.4	Variation de la présence de Pm avec la phase lunaire . . . . .	24
7.5	Discussion . . . . .	28
<b>8</b>	<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>28</b>
<b>9</b>	<b>ANNEXES</b>	<b>30</b>
9.1	Caractérisation de détecteur . . . . .	30
9.2	Données de références de <i>Sc</i> - <i>Stenella coeruleoalba</i> . . . . .	31
9.3	Données de références de <i>Zc</i> . . . . .	31
9.4	Exemples de fichiers Antares annotés par expert Dyni pour Pm . . . . .	31
9.4.1	Vrais positifs de cachalot triés par ICI . . . . .	31
9.4.2	Exemples de faux négatif et positif, et vrai négatif de cachalot . . . . .	32
9.5	Exemples de fichiers Antares annotés à Dyni pour <i>Sc</i> / autre . . . . .	32
9.5.1	Vrais positifs <i>Sc</i> triés par ICI . . . . .	32

9.5.2	Exemples de trois faux négatifs et d'un vrai négatif de Sc . . . . .	33
9.5.3	Exemples avec Pm et Sc . . . . .	33
9.5.4	Exemple avec ping Antares . . . . .	33

# 1 Résumés

## 1.1 Résumé des objectifs

Beaucoup d'animaux marins produisent des sons pour communiquer, se repérer ou chasser. La bioacoustique passive permet de les étudier sans les perturber. Des analyses systématiques sur de longues durées, rendues possibles par le numérique, et couplées à des programmes scientifiques non bioacoustiques, mettent en évidence des variations comportementales en fonction de différents paramètres environnementaux. C'est le sujet de cette étude DECAN, qui propose une méthode originale de détection de transitoires d'odontocètes, et qui aboutit à des résultats prometteurs sur un corpus acoustique de l'observatoire astrophysique Antares. Ce corpus est constitué d'une vingtaine d'hydrophones large bande, posés dans les abysses de Toulon à -2.3 km, à 10 km au sud de la presqu'île de Giens. Les données brutes acoustiques d'Antares doivent être traitées avec précaution, car elles sont produites pour la détection de neutrinos. Elles sont en partie entachées de signaux de maintenance pour le recalage des colonnes de capteurs optiques. Après suppression des signaux incluant des pings astrophysiques qui dénaturent l'enregistrement Antares, 1686 fichiers de 5 secondes sont exploitables sur 55 jours entre le 31 août et le 31 octobre 2012, avec une moyenne de 30 fichiers par jour. Les signaux, remontés par fibre optique au sud de Toulon sont échantillonnés à 250 kHz. Le projet DECAN se limitait à l'analyse mono-hydrophone. Nous avons donc sélectionné l'hydrophone H21 pour sa qualité.

Nous proposons dans DECAN un traitement temps-réel par ondelettes, pour détecter et séparer finement sur Antares les activités acoustiques transitoires de deux espèces d'odontocètes, parfois simultanément actives. Nous dressons les corrélations des comportements acoustiques de ces espèces avec des émissions acoustiques attribuables aux activités humaines, c'est à dire les bruits basse fréquence (trafic maritime). Nous avons également, dans la continuité de notre analyse Pelagos Boussole 2009-10 [?] analysé les dépendances à la phase lunaire. Nous donnons les premières statistiques croisant ces observables, ce qui n'avaient pas encore à notre connaissance été analysées sur Antares. Nous montrons la relative asynchronie des activités des deux espèces de cétacés, leur variation suivant les sources acoustiques basse-fréquence (passe-bas à 500 Hz), et suivant la phase lunaire.

## 1.2 Résumé des résultats

La première espèce formellement identifiée est *Physeter macrocephalus* (Pm), le cachalot, qui est la cible du projet DECAN. L'identification de cette espèce est sûre avec sa fréquence (bande de 3 kHz à 18 kHz) et sa forme d'onde caractéristique (structure multipulsée).

Les activités acoustiques de Pm tendent à montrer que la hausse d'intensité des sources basse-fréquence, caractéristiques du trafic maritime, diminue légèrement l'activité de Pm, sans que ce corpus limité puisse garantir une différence significative à 95%.

De plus nous avons analysé la dépendance de la présence de Pm à la phase lunaire.

Nous constatons une diminution significative (à 99%) du taux de détection acoustique de Pm entre pleine lune (39% de positifs), et nouvelle lune (22%).

Nous faisons deux hypothèses. La première serait que Pm fréquente moins la zone en nouvelle Lune. La seconde, plus probable, serait que la migration de la biomasse vers la surface en pleine Lune augmenterait la densité des proies de Pm en haut de la colonne d'eau. Donc, en pleine Lune, Pm chasserait en eau moins profonde, et ses remontées seraient plus rapides. La plongée étant caractérisée par moins d'émission de clics que la phase de prédation, et Pm cliquant peu en remontée, il y aurait en pleine Lune plus d'émission de clics. La probabilité de détection acoustique de Pm augmenterait en pleine Lune. Cette hypothèse devrait à plus long terme être validée en estimant le profil de sonde de Pm par nos procédés de trajectographie passive sur l'ensemble des hydrophones d'Antares, malgré leurs positions imprécises car fixés sur des colonnes flottantes.

La seconde espèce détectée la plus vraisemblable est *Stenella coeruleoalba* (Sc). Sc n'était pas une cible du projet DECAN, mais nous avons procédé à une double expertise pour l'identifier. En effet, H21 est à -2.2 km de la surface, donc la probabilité est faible de détecter les transitoires de Sc car de faible puissance et lointain (à plus de 1.5 km car a priori pas de sonde de Sc en dessous de -0.7 km). Cependant, les signaux détectés ont un fort rapport signal sur bruit. C'est un paradoxe qui pourrait être levé à terme en estimant la profondeur de chaque sonde de cet odontocète en intégrant les autres hydrophones d'Antares.

Nous montrons que contrairement à Pm, l'activité acoustique de Sc diminue significativement pour un bruit basse-fréquence d'énergie supérieure à la médiane de quelques pourcents. Le détecteur n'est pas sensible à ce bruit, donc soit Sc est perturbé dans ses sondes profondes, soit il fréquente plus la surface, étant courant d'observer Sc proche des bateaux.

L'autre identité de cette seconde espèce pourrait-être *Zyphius cavirostris* (Zc), du fait des fréquences compatibles, et ses sondes très probables sous -1.7 km, à quelques centaines de mètres de H21, ce qui expliquerait le bon rapport signal sur bruit des détections. Cependant les formes d'onde sont plus similaires à Sc qu'à Zc. De plus, Sc est fréquent en plaine abyssale, notamment celle d'Antares (DECAV Pelagos 2010-2012), alors que Zc y est rare (Gannier Pelagos 2012). D'autres programmes sur la zone, comme Bombyx, permettront de croiser plus de détections, notamment celles en surface à corrélérer avec celles des abysses.

En conclusion, DECAN confirme qu'Antares apporte des connaissances sur la faune du sanctuaire de Pelagos, ce que le programme Lido commença à faire, mais DECAN en augmente la précision, même sur ce protocole Antares non bioacoustique. DECAN démontre l'enjeu du passage à l'échelle de la bioacoustique, sur des séquences long terme et des signaux large spectre. Qu'il s'agisse de structures d'acquisition plus ou moins complexes, les traitements du signal peuvent être adaptés pour extraire des informations éthologiques, liées notamment aux perturbations anthropiques (bateaux, chantiers, tourisme...).

L'équipe Dyni est maintenant officiellement intégrée dans le consortium Antares,

et nous avons mené durant le déroulement du projet DECAN les opérations administratives et techniques pour connecter sur les fibres optiques de l'institut Pacha l'un de nos serveurs dédié donc à un protocole purement bioacoustique, à adapter à d'éventuelles directives de Pelagos ou du PNPC. Cette acquisition des flux acoustiques en amont des protocoles astrophysiques, plus régulière et sur de plus longues séquences, augmenterait la qualité des modèles.

## 2 Introduction

### 2.1 Contexte

Ce projet DECAN est né de la conjonction des recherches en codage et détection bioacoustiques de l'équipe DYNI<sup>1</sup>(DYNamiques de l'Information), des efforts en gestion de masses de données bioacoustiques du service DSIUN de l'UTLN, et des besoins de Pelagos de mieux caractériser la population de cachalot autour des îles d'Or. Dyni est une équipe de l'UMR CNRS LSIS<sup>2</sup>(Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes), composée de 6 permanents et d'environ 12 non permanents, située sur le campus de La Garde de l'Université de Toulon.

Les chercheurs de Dyni travaillent depuis plus de dix ans sur des problèmes variés en apprentissage et modélisation stochastique de signaux complexes, notamment sur des questions de représentation, classification et de détection sur des séquences bioacoustiques, notamment de cétacés. Dans ce rapport, les modèles de Dyni sont transposés à un observatoire bioacoustique assez particulier, car dédié à l'astrophysique. Ce sont donc des traitements adaptés à ces données que nous avons du mettre en place.

Ce type d'analyse rentre dans une nouvelle catégorie dite à l'échelle. En effet, sa vocation est de démontrer qu'il est possible de traiter avec finesse, en continu et en temps-réel les flux de données bioacoustiques massives large bande remontant par fibre optique sur Toulon depuis les abysses où repose Antares. Notre volonté de proposer nos méthodes pour traiter ces données Antares remonte à 6 ans [? ], nous avons donc souhaité décrire ce premier jeu de données Antares qui nous a été confié avec précision. Nous avons alors décidé, même si cela n'était pas un objectif du projet initial, jugé intéressant d'identifier outre le cachalot, une autre espèce qui émet dans la plupart des fichiers traités. Nous avons alors séparé efficacement en temps-réel les transitoires de ces deux espèces de cétacés en excluant automatiquement les transitoires propres à l'expérience astrophysique. Nous montrons que ces détections permettent d'inférer les variations d'activité quotidienne moyenne de ces deux espèces. De plus nous montrons l'influence sur ces activités de la phase lunaire et de l'énergie acoustique basse fréquence caractéristique du trafic maritime. Ces résultats, nous l'espérons, ouvrent une nouvelle perspective d'acquisition de connaissances sur Pelagos Nord.

---

1. <http://www.lsis.org/dyni/>

2. <http://www.lsis.org>

## 2.2 Remerciements

Ce projet DECAN, commencé en novembre 2013, est soutenu par le programme PELAGOS, le PNPC et son conseil scientifique que nous remercions pour sa confiance sur ce type de projet qui repose sur des données complexes. Nous remercions également Pelagos international et le Ministère de l'Écologie et de l'Environnement, de l'Énergie et du Développement durable et de la Mer pour leurs soutiens.

DECAN s'intègre dans le programme de la Mission Interdisciplinaire des instituts INSU, INE, INSB, IN2SI du CNRS en MASSE DE DONNEES SCIENTIFIQUES (MASTODONS), pour son volet Scaled Acoustic Biodiversity [*SABIOD*] 2012-2017 piloté par H. Glotin et qui regroupe une quinzaine d'équipes internationales en analyse du signal et classification de masses de données bioacoustiques appliqués en biodiversité (<http://sabiod.univ-tln.fr>).

DECAN représente aussi un volet de la chaire en analyse de scène bioacoustique à l'échelle de H. Glotin à Ces effets lunaires, si confirmés, pourraient moduler la gestion de sites. l'Institut universitaire de France.

Nous remercions tous les partenaires de l'observatoire ANTARES, notamment Robert Lahdman, Dominique Lefèvre et Pascal Coyle, qui nous ont depuis plusieurs mois aidé, en nous concédant des données ramenée depuis le centre d'archivage Antares en Allemagne, et en nous aidant dans l'écriture du décodeur que nous avons du programmer pour lire les données acoustiques brutes, initialement formatées pour des traitements purement liés au programme astrophysique.

Certains pré-résultats de ce rapport ont été présentés et discutés au printemps 2014 lors de la conférence internationale Antares, et ont intéressé la communauté Antares par leur précision. Nous remercions donc le comité Antares de sa confiance, et pour nous intégrer officiellement dans son consortium fin 2013, ce qui ouvre des perspectives très intéressantes discutées en fin de rapport.

## 2.3 Responsable de l'étude et référence des données

Le responsable et contact principal de ce projet est Pr. Hervé Glotin, directeur de l'équipe Dyni de l'UMR CNRS LSIS, à l'Université de Toulon et membre de l'IUF. Pour toute correspondance :

Glotin H.

Université de Toulon

Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes (LSIS)

Avenue de l'Université BP 20132

83957 La Garde Cedex

Tél : 04 94 14 28 24    [glotin@univ-tln.fr](mailto:glotin@univ-tln.fr)    <http://glotin.univ-tln.fr>

Toutes les analyses par ondelettes des fichiers sources intégrés dans cette étude



sont disponibles en ligne sur le serveur de SABIOD à :

[http://sabiod.univ-tln.fr/public\\_data/ANTARES\\_V3\\_21/RESULTS](http://sabiod.univ-tln.fr/public_data/ANTARES_V3_21/RESULTS)

## 3 Corpus

### 3.1 Bases de référence bioacoustique en cétologie

Nous avons travaillé sur le corpus Antares et sur les enregistrements de référence d'espèces présentes dans Pelagos. Des sources de données de référence sont disponibles comme MobySound[?] et Darewin[?]. Ces deux bases de données libres regroupent des enregistrements audio et vidéo de cétacés. L'intérêt de ces données est qu'elles sont, pour certaines, annotées avec parfois des étiquettes temps-fréquence, et permettent donc de construire et tester des modèles. Cependant, pour les baleines à bec, les échantillons référencés sont encore en petit nombre.

Les enregistrements de MobySound ont une fréquence d'échantillonnage de 192 kHz, ce qui donne une bande utile d'au plus 96 kHz (théorème Nyquist-Shannon). Cette bande, qui est plus étroite que celle des signaux Antares (125 kHz) même en tenant compte de la réponse de l'hydrophone Antares, est suffisante pour classer les voisements mais surtout les transitoires d'odontocètes de la zone Pelagos, dont cette table rappelle les moyennes de fréquence et de niveau de source [? ? ?] :

- Rorqual commun - Mugissement : 0.03-0.750 kHz, niveau de source 155-165 dB (re  $1\mu\text{Pa}$  à 1m)
- Grand dauphin - Sifflement : 0.8-24 kHz, niveau de source 125-173 dB
- Grand dauphin - clic : 110-130 kHz, niveau de source 218-228 dB
- Dauphin de Risso - Clic : 65 kHz, niveau de source 120 dB
- Dauphin bleu et blanc - *Stenella coeruleoalba* - Sifflement : 6-24 kHz
- Dauphin bleu et blanc - *Stenella coeruleoalba* - Clic : 17-34 kHz
- Cachalot - *Physeter macrocephalus* - Clic : 3-20 kHz, niveau de source 210-230 dB
- Globicéphale - Sifflement : 0.5-20 kHz, niveau de source 180 dB
- Baleine à bec de Cuvier - *Ziphius cavirostris* - Clic : 25-50 kHz, niveau de source jusqu'à 214 dB

### 3.2 Enregistrements de l'observatoire de neutrino Antares

Les hydrophones d'Antares sont situés sur une structure de plusieurs colonnes flottantes de sous-marines au large de Toulon (cf figure en couverture), destinées à la détection de neutrinos. Ces hydrophones mesurent l'effet acoustique dit de Tcherenkov, lors de la transformation du neutrino en photon, et permettent aussi d'estimer les positions des capteurs photoniques des colonnes par émission régulière depuis une source fixe d'un ping acoustique (que l'on nommera ping dans ce rapport).

Antares est constitué d'une vingtaine d'hydrophones large bande, posés à 2.3 km sous la surface et à 10 km au sud de la presqu'île de Giens, ce qui confère un intérêt bioacoustique. La situation générale est donnée dans les figures ci-dessous 1 et 2.

FIGURE 1 – Vue d'artiste du détecteur de neutrino Antares, au large de Toulon  
Source : <http://antares.in2p3.fr/Gallery/3D/index.html>. On distingue les colonnes de capteurs photoniques (boules) et les hydrophones entre les boules.