

Estimation robuste par acoustique passive de l'Intervalle-Inter-Pulse des clics de *Physeter macrocephalus* : méthode et application sur le Parc national de Port-Cros

Régis ABEILLE^{1,2,3,5}, Yann DOH^{2,3,5}, Pascale GIRAUDET^{2,4,5},
Hervé GLOTIN^{1,2,3,5,7*}, Jean-Marc PREVOT^{2,5,6}, Céline RABOUY^{1,2,3,5}

¹Aix Marseille Université, CNRS, ENSAM, LSIS UMR 7296, 13397 Marseille, France.

²Université de Toulon, CNRS, LSIS UMR 7296, 83957 La Garde, France.

³Equipe Dynamiques de l'Information [DYNI].

⁴Département de Biologie.

⁵SABIOD Project Group MI CNRS MASTODONS <http://sabiod.org>

⁶Département d'Informatique.

⁷Institut Universitaire de France (IUF), 103 Bd St-Michel, 75015 Paris, France.

*Contact : glotin@univ-tln.fr

Résumé. Le cachalot (*Physeter macrocephalus*) émet des clics de quelques millisecondes composés d'une séquence de pulses. L'intervalle de temps entre ces pulses (IPI) dépend entre autres paramètres de la taille de l'animal. L'IPI est dans l'état de l'art estimé manuellement par moyenne d'auto-corrélation de clics, ou par leur cepstre moyen. Coûteuses en temps, ces méthodes sont faussées par l'orientation du cachalot par rapport à l'hydrophone et donc imprécises, et sont peu fiables pour discriminer les individus. Nous proposons un algorithme (BIVIP) plus rapide et robuste à l'orientation de l'animal et à des émissions concomitantes de plusieurs cachalots. Les relations allométriques de la bibliographie permettent alors d'estimer la taille de chaque cachalot détecté, même en cas d'enregistrements simultanés de plusieurs individus. BIVIP est validé sur le corpus que nous avons enregistré dans le nord-ouest du Sanctuaire Pelagos, autour des îles d'or du Parc national de Port-Cros durant le programme de recherche Pelagos DECAV 2009-2012. Nous montrons un gain significatif des contacts par acoustique comparativement au transect visuel (facteur 4 environ), ainsi qu'une faisabilité à 86 % de la détermination par acoustique de la taille. Nous concluons sur une discussion de la composition de la population observée.

Mots-Clés : *Physeter macrocephalus*, intervalle inter-pulse (IPI), estimation de la taille, suivi par acoustique passive, bio-sonar, bioacoustique, clic multipulsé.

Abstract. Robust Estimate by Passive Acoustics of *Physeter macrocephalus* Inter-Pulse-Interval Clicks: Methodology and Application in Port-Cros National Park. The Sperm whale (*Physeter macrocephalus*) produces clicks of a few milliseconds composed by a sequence of short pulses. The spacing of some pulses (IPI) is a key measure to discriminate the whales and to assess their length. The IPI is usually estimated manually based on average autocorrelation, cepstrum or waveform. However, these methods are time-consuming and biased by the orientation of the hydrophone, thus they are unreliable for discriminating individuals. We propose a new

IPI (automatic) algorithm allowing to segregate and to count precisely the whales. Using published allometric rules, this method can be used to estimate the size of each detected sperm whale, even when simultaneous recordings are made. Our algorithm has been validated, based on recordings done in the northwest of the Pelagos Sanctuary, around the Hyères archipelago and Port-Cros national Park during the 2009-2012 DECAV research program. We demonstrate in this paper a significant improvement of the whale detection (by a factor 4 compared to visual detection), a 86% achievable determination of whales through acoustic detection of their size. We conclude with a discussion on the composition of the observed population.

Keywords: *Physeter macrocephalus*, inter-pulse Interval (IPI), length estimation, passive acoustic survey, bio-sonar, bioacoustics, multipulsed click.

Introduction

Cet article est le fruit d'un projet de suivi bioacoustique du cachalot (DECAV) dans le Parc national de Port-Cros (PNPC), en charge de l'animation de la Partie française du Sanctuaire Pelagos (Barcelo et Boudouresque, 2012). Nous avons dans ce cadre élaboré un nouvel algorithme d'analyse de la structure multipulsée des clics de cachalots. Nous présentons en détail notre méthode, ses objectifs, et sa validation sur les données enregistrées durant DECAV.

Les cachalots, au dimorphisme sexuel marqué (les femelles mesurant de 11 à 12 m, et les mâles de 13 à 16 m (Antunes, 2010)) peuvent être dénombrés d'une saison à l'autre par leur taille car ils se regroupent en général en petit nombre d'adultes et de jeunes. Leur taille est cependant délicate à mesurer car les cachalots sont rarement visibles, enchaînant des cycles de 50 minutes de sonde pour 10 minutes en surface environ. Une alternative à la photogrammétrie est la bioacoustique, science interdisciplinaire mêlant informatique, traitement du signal et biologie. Elle est en général utilisée pour détecter, localiser et catégoriser des événements complexes dont des sons de différentes espèces (Glotin *et al.*, 2013a et 2013b ; Glotin, 2014). Des informations sur la physiologie de l'émetteur peuvent aussi être extraites. Cet article propose une mesure précise de la structure du clic de cachalot, qui peut être dérivée en taille suivant des lois de l'état de l'art.

Le clic transitoire du cachalot a une structure multipulsée riche, liée à sa taille du fait de la géométrie de son organe de production acoustique (Zimmer *et al.*, 2005a ; Zimmer *et al.*, 2005b). En effet, l'impulsion initiale de ce biosonar est générée par les lèvres phoniques proches de l'événement, puis elle se propage dans le spermaceti et le *junk* posé sur la mandibule supérieure, avec de multiples réflexions sur le sac frontal et le sac distal (Fig. 1).

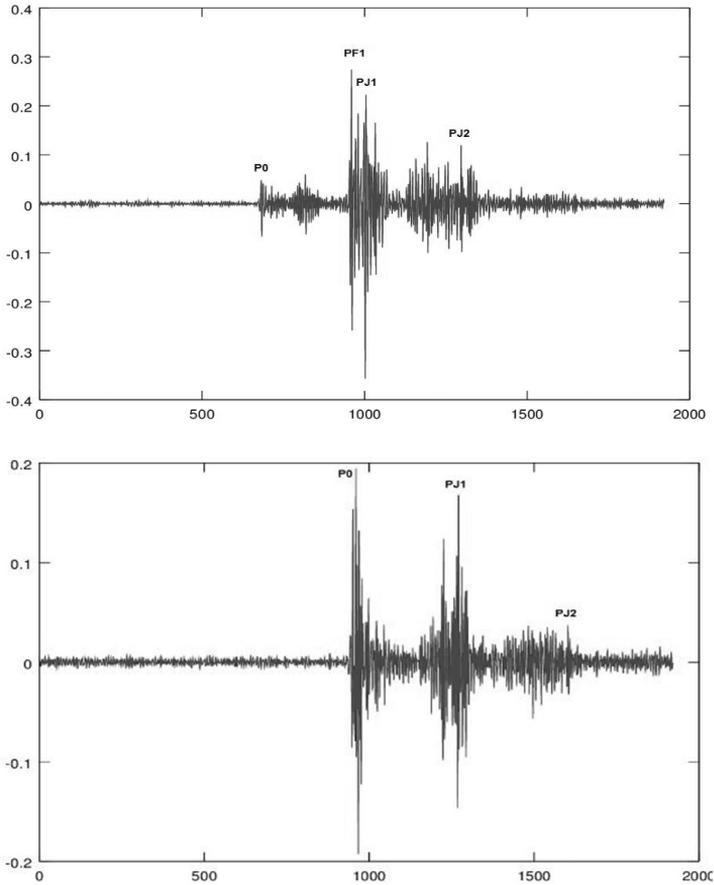


Figure 2. Deux clics de cachalot (enregistrés à la fréquence d'échantillonnage de 48 kHz), suivant deux orientations museau-hydrophone différentes, mettant en évidence les différentes amplitudes relatives des pulses P0, PJ1 et PJ2, et donc la difficulté pour les identifier¹ (Zimmer, 2005a). En abscisse le numéro d'échantillon du signal (1 échantillon = 1/48 ms donc durée totale de 41 ms). En ordonnée l'amplitude du signal normalisé (sans unité).

Des techniques semi-automatiques pour mesurer l'IP1 ont été proposées (Pavan *et al.*, 1997; Teloni *et al.*, 2007; Antunes *et al.*, 2010). Elles sont basées sur l'amplitude, l'auto-corrélation ou le cepstre moyen. Ces méthodes requièrent une expertise humaine. De plus si elles sont basées sur une moyenne d'observations pour supprimer (en partie) les effets de l'orientation, elles échouent dans le cas où il y a plusieurs cachalots du fait de la difficulté d'affecter un clic à un individu. Au final il est conseillé de comparer deux méthodes

¹ Une animation en réalité virtuelle d'une plongée réelle de cachalot, incluant l'enregistrement réel, calculée en 3D par notre brevet, permet pour le lecteur intéressé d'analyser certains de ces effets d'orientation <http://sabiod.org/oncet>

semi-automatiques pour obtenir un résultat aussi bon qu'en analyse purement manuelle (Antunes *et al.*, 2010).

Nous proposons dans cet article notre nouvel algorithme qui détermine avec plus de robustesse l'IPI nominal d'un cachalot, même dans le cas où des clics de plusieurs individus sont superposés dans le même enregistrement. L'algorithme est conçu pour être aussi robuste à l'orientation de l'animal par rapport à l'hydrophone. Nous donnons les résultats d'IPI obtenus sur le corpus que nous avons enregistré durant le même projet DECAV. Nous les comparons au bilan du protocole visuel qui a été réalisé en priorité durant ce même projet.

Matériel

Le corpus a été enregistré sur 26 sorties entre mai 2011 et octobre 2012, depuis un zodiac ou un bateau avec le PNPC ou pour certaines sorties avec l'Association Regard du Vivant (Tabl. I et II). Les enregistrements² sont mono-hydrophones, de 5 minutes chacun, ce qui permet si un cachalot émet dans un hémisphère d'environ 3 km de rayon, d'enregistrer en moyenne 300 clics par fichier (taux moyen d'émission = 1 clic/sec). L'hydrophone est le CR55 (de *Cetacean Research SA Seattle*), ayant une réponse plate sur la bande d'intérêt, immergé à environ -20 m (câble de 30 m à 50 m). La fréquence d'échantillonnage est de 48 kHz, le codage sur 16 bits par carte son PC DELL Latitude ATG.

Algorithme

Notre algorithme nommé BIVIP (pour *BIVariate IPI estimation*) comporte les 3 étapes ci-dessous :

ETAPE 1 : Détection des clics. Tout d'abord le signal est filtré entre 5 kHz et 24 kHz (par un filtre de type Butterworth d'ordre 5) pour atténuer le bruit ambiant (mer, bateaux, etc., et filtrer d'autres espèces). Puis nous détectons les clics sur chaque portion de 5 minutes en triant les 300 impulsions de plus fortes amplitudes. Un filtre de Teager-Keaser peut être appliqué en cas de perturbations fortes (Glotin, 2008 ; Glotin *et al.*, 2013).

ETAPE 2 : Estimation des IPI de chaque clic extrait en étape 1. Soit H1 le pulse de plus grande amplitude du clic. Plusieurs pulses secondaires du clic sont détectés de part et d'autre de H1 par une heuristique prenant en compte l'étalement temporel des pulses (Etape

² nb : plusieurs fichiers acoustiques qui ont été traités dans cet article sont disponibles en ligne sur le site <http://sabiiod.univ-tln.fr/media> (format.wav, sans compression).

2.1 'Maxshift'). Ces détections permettent de calculer, par différence avec H1, autant d'IPI, dont n'est retenu que le couple le plus symétrique par rapport à H1 illustrant donc les réflexions dans le museau (Etape 2.2 'BIVIPLocal'). Sont alors estimés deux IPI : $P_0P_{J1} = IPI1^*$ et une observation de $P_{J1}P_{J2} = IPI2^*$. Soit $H2 = IPI2^* + date (H1)$, la même procédure est lancée centrée sur H2. Dans le cas général, on obtient une seconde estimation de $P_{J1}P_{J2}$ notée $IPI3^*$, ainsi que $IPI4^* = P_{J2}P_{J3}$. Dans le cas où $P0 = H1$ (cf. Fig. 2b), alors $IPI3^* = P_0P_{J1}$ et $IPI4^* = P_{J1}P_{J2}$.

Etape 2.1 Estimation des pulses d'un clic : Maxshift (*Clic, H, Taille Pulse, Nbl, Nbr*)

Entrées : *Clic* (vecteur signal du clic), *H* = date d'un pulse de référence dans le clic, *TaillePulse, Nbr, Nbl* (scalaires).

Sorties : Dates dans le clic de *Nbl* pulses avant *H*, et *Nbr* pulses après *H*, en respectant des délais minimums et une heuristique sur la répartition des pulses :

Valeurs par défaut : *TaillePulse* = 1 ms x FE, *Nbl* = 3, *Nbr* = 4, FE = Fréquence d'Echantillonnage

```

Pre(0) = Post(0) = H                                % Date de référence
Pour i variant de 1 à Nbl                            % Recherche de Nbl
                                                    pulses candidats avant H
Pre(i) = Max (Clic (1 à Pre(i-1) – TaillePulse / 2))
Fin de la boucle sur i
Pour i variant de 1 à Nbr                            % Recherche de Nbr
                                                    pulses candidats après H
Post(i) = Max (Clic (Post(i-1) + TaillePulse / 2 à fin))
Fin de la boucle sur i
Retour des Pre(i)  $i \in [1..Nbl]$  et Post(i)  $i \in [1..Nbr]$ 
% Dates des pulses d'intérêt

```

Etape 2.2 Estimation des IPI d'un clic : BIVIPLocal (*Clic, TaillePulse, Nbl, Nbr*)

Entrée : *Clic* (vecteur signal du clic), *TaillePulse, Nbr, Nbl* (scalaires)

Sortie : L'estimation des quatre IPI les plus vraisemblables : $IPI1^*$, $IPI2^*$, $IPI3^*$, $IPI4^*$

Valeurs par défaut : *TaillePulse* = 1 ms * FE, *Nbl* = 3, *Nbr* = 4
 $H_1 = \text{ArgMax}_t (\text{Clic} (t))$ % Date du pulse de référence

```

[Pre1, Post1] = Maxshift (Clic, H1, TaillePulse, Nbl, Nbr)
                                                    % Dates des pulses candidats

```

$IPI1 = \{H1 - Pre1\}$	% Ensemble des Nbl délais entre les pulses Pre1 et H ₁
$IPI2 = \{Post1 - H1\}$	% Ensemble des Nbr délais entre H1 et les pulses Post1
$(IPI1^*, IPI2^*) = \text{ArgMin}_{i,j} (IPI1(i) - IPI2(j))$	% Sélection des IPI symétriques
$H_2 = H_1 + IPI2^*$	% Décalage à droite du pulse de référence
$[Pre2, Post2] = \text{Maxshift}(Clic, H_2, TaillePulse, Nbl, Nbr)$	% Dates des pulses candidats
$IPI3 = \{H2 - Pre2\}$	% Ensemble des Nbl délais entre les pulses Pre2 et H ₂
$IPI4 = \{Post2 - H2\}$	% Ensemble des Nbr délais entre H2 et les pulses Post2
$(IPI3^*, IPI4^*) = \text{ArgMin}_{i,j} (IPI3(i) - IPI4(j))$	Retour des 4 IPI les plus vraisemblables : IPI1*, IPI2*, IPI3*, IPI4*

ETAPE 3 : Calcul de la densité de probabilité (par fréquence normalisée) des quatre estimations d'IPI sur tous les clics extraits de l'étape 1. Nous illustrons un résultat (Fig. 3) sur un fichier de 5 minutes de DECAV du 5 mai 2012 : à gauche IPI1* (ou 'PreH') en ordonnée, et IPI2* (ou 'PostH') en abscisse; à droite IPI3* (ou 'PreH') en ordonnée et IPI4* (ou 'PostH') en abscisse. La précision de l'estimation de l'IPI augmente de gauche à droite, la dernière distribution intègre majoritairement l'IPI nominal, donc elle l'estime en son maximum. Si la distribution de l'IPI nominal fait apparaître plusieurs modes, chacun peut représenter un individu.

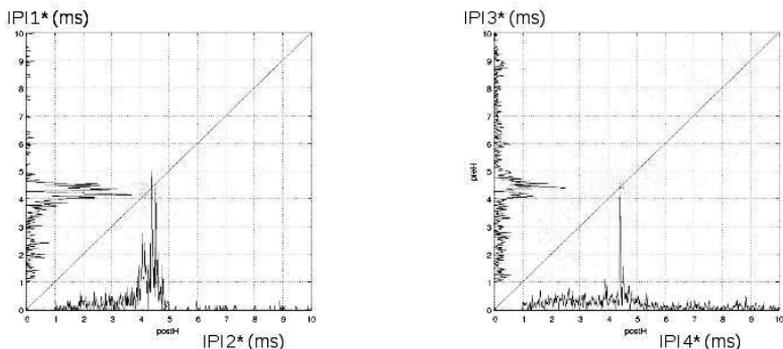


Figure 3. Distribution de probabilité de chaque IPI* estimée par BIVIPLocal sur 300 clics d'un enregistrement de 5 minutes du 5 mai 2012 de DECAV. A gauche la probabilité de l'IPI1* (ord.) et IPI2* (abs.). A droite la probabilité de l'IPI3* (ord.) et l'IPI4* (abs.). Cette dernière estimation est la moins ambiguë puisqu'elle intègre majoritairement l'IPI nominal, c'est à son maximum qu'est donc estimé l'IPI nominal. L'unité des axes est la milliseconde.

L'IPI nominal peut être ensuite converti en taille via une relation allométrique, comme la relation affine construite par Growcott (Growcott *et al.*, 2011) que nous prenons dans cette étude :

Taille cachalot (mètre) = $1,258 * \text{IPI (seconde)} + 5,736$

D'autres relations existent (Clarke, 1978; Møhl, 1981; Gorgon, 1991). Cependant la relation de Growcott se base sur un large échantillonnage de mesures acoustiques et photographiques, et semble être la plus fiable. Notons cependant qu'aucune de ces relations n'est construite sur des échantillons méditerranéens. Elles peuvent donc être biaisées de quelques centimètres sur Pelagos. Dans tous les cas, les mesures IPI permettent de séparer les individus car la précision de l'IPI est de l'ordre de 1/48 ms.

Résultats

Les résultats du projet DECAV résumés dans les tableaux I et II montrent que seulement 1/4 (5/21) des cachalots enregistrés ont été vus en surface, ce qui démontre un des intérêts de l'acoustique passive en terme de détection. Aucun des animaux vus en surface, même parfois photographiés, n'ont pu être visuellement mesurés, alors que plus des 3/4 (18/21) des cachalots enregistrés ont été mesurés acoustiquement avec BIVIP. Néanmoins 3/21 des enregistrements ne permettent pas de mesurer l'IPI du fait d'un trop faible Rapport Signal à Bruit (RSB), ou parce que la durée d'enregistrement est trop courte (des améliorations de l'algorithme sont en développement à l'Université de Toulon par l'équipe DYNI pour tenter de tirer encore plus d'information de ces cas limite, néanmoins, si le RSB des pulses secondaires est trop faible alors la mesure est compromise pour toute méthode).

Notons que 100 % des cachalots contactés ont été enregistrés par notre système, 86 % d'entre eux ont pu alors être mesurés acoustiquement. Seulement 24 % d'entre eux ont été détectés visuellement, cependant sans aucune mesure de taille photogrammétrique (Tabl. II).

Tableau I. Résultats bruts de toutes les sorties du projet DECAV : les cinq cachalots vus ont été mesurables uniquement acoustiquement, comme 16 autres uniquement contactés acoustiquement sur un total de 21 contacts acoustiques de cachalots ('PNPC': catamaran moteur ou zodiac du PNPC, 'RdV' : association Regard du Vivant).

Date des 27 sorties	Bateau PNPC ou 'Regard du Vivant'	Nbr contact visuel (Tot. 5)	Nbr contact acoustique (Tot. 21)	Horaire du contact	IPI +/- 0,01 ms (si mesurable)	Taille (m) suivant Growcott	Zone du contact
06/05/2011	PNPC	0	2	11h57	4,88 et ?	11,88	Tête du canyon des Stoechades
19/05/2011	PNPC	0	1	10h49	5,66	12,86	4 km au Sud de Port-Cros
07/06/2011	PNPC	0	0	-	-	-	-
12/07/2011	PNPC	0	0	-	-	-	-
28/07/2011	PNPC	0	0	-	-	-	-
02/08/2011	PNPC	1	1	9h45	4,54	11,45	8 km au Sud-Est du Levant
31/08/2011	PNPC	0	1	10h52	5,38	12,50	7,5 km au Sud de Porquerolles
16/09/2011	PNPC	0	0	-	-	-	-
26/01/2012	PNPC	0	2	10h47	4,35 et 4,55	11,21 et 11,46	9 km au Sud de Porquerolles
16/03/2012	PNPC	0	0	-	-	-	-
26/03/2012	PNPC	0	0	-	-	-	-
04/05/2012	PNPC	0	0	-	-	-	-
30/05/2012	PNPC	1	2	10h53 et 11h27	4,40 et 4,45	11,27 et 11,33	Canyon des Stoechades
06/06/2012	PNPC	0	1	9h20	6,3*	13,66*	3 km à l'Est du Levant
07/06/2012	PNPC	0	0	-	-	-	-
15/06/2012	PNPC	0	0	-	-	-	-
28/06/2012	PNPC	0	0	-	-	-	-
10/07/2012	RdV	1	2	9h52	4,86 et ?	11,85	Large Cap Sicié
23/07/2012	PNPC	0	0	-	-	-	-
02/08/2012	RdV	0	2	10h16	4,90 et 4,78	11,90 et 11,74	8 km au Sud-Est du Levant
23/08/2012	PNPC	0	1	-	?	-	-
09/09/2012	RdV	0	0	-	-	-	-
16/09/2012	RdV	0	0	-	-	-	-
17/09/2012	RdV	1	2	14h04 et 14h09	4,60 et 4,66	11,52 et 11,60	Cassis Sud - Bec de l'aigle
23/09/2012	RdV	0	1	13h58	5,72	12,93	Sud Cassis - Cap de l'aigle
06/10/2012	RdV	1	2	17h23 et 17h56	4,44 et 5,62	11,32 et 12,80	Large Cap Sicié
28/11/2013	RdV	0	1	15h30	5,5*	12,65*	Cassis Sud - Bec de l'aigle

* taille estimée visuellement par un opérateur sur le signal.

Tableau II. Synthèse du projet DECAV : 21 cachalots ont été contactés acoustiquement, dont seulement 5 (24%) visuellement, et 18 (86%) ont été mesurés acoustiquement par BIVIP.

	Tot.	%
Nombre de Jours de sorties (PNPC + RdV)	27	-
Sorties avec contact visuel de cachalot(s)	5	18%
Sorties avec contact acoustique de cachalot(s)	14	52%
Sorties avec contact visuel et acoustique de cachalot(s)	5	18%
Sorties permettant une mesure acoustique de la taille	13	48%
Cachalots en contact acoustique	21	100%
Cachalots en contact visuel	5	24%
Cachalots en contact visuel et acoustique	5	24%
Cachalots mesurés acoustiquement	18	86%
Durée des enregistrements de cachalot	6h30	-
Enregistrements permettant la mesure acoustique de la taille	2h20	36%

Conclusion

La distribution des tailles obtenues par BIVIP (Fig. 4) montre 2 modes différents : le premier mode (A) entre 11 et 12 mètres, et le second (B) pour des cachalots plus grands (12,5 m à 13 m). D'après le dimorphisme sexuel (Antunes, 2010), nous pouvons faire l'hypothèse que A représente le groupe des femelles (adultes et jeunes) plus les jeunes mâles, et B le groupe des mâles adultes. Grossièrement, chacune des 4 classes semblerait composée de 4 individus. Cette proportion sera à valider sur 3 à 4 fois plus de détections acoustiques à produire dans les années à venir.

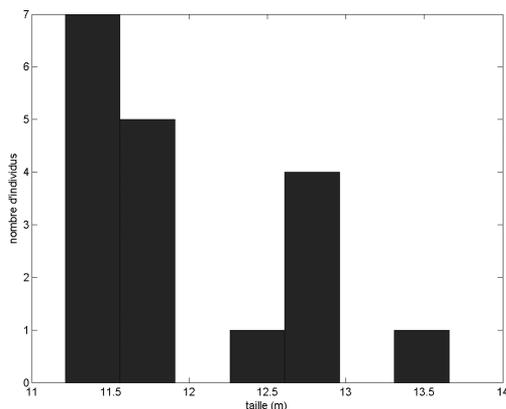


Figure 4. Distribution des tailles des 18 animaux analysés sur les 78 fichiers de 5 minutes de DECAV. Il apparaît trois modes centrés sur 11,5 m, 12,5 m 13,5 m, ceux de droite seraient dus à la présence de mâles adultes.

Nous donnons la carte (Fig. 5) des fréquences de détection, regroupant les animaux vus en surface, donc inactifs acoustiquement, avec ceux en sonde et acoustiquement actifs. Les zones de plus forte probabilité de présence semblent être le canyon de Cassis et le sud Sicié, ce qui reste à confirmer sur un plus long corpus. Aucune corrélation n'a pu être établie entre le lieu de détection d'un individu et sa taille.

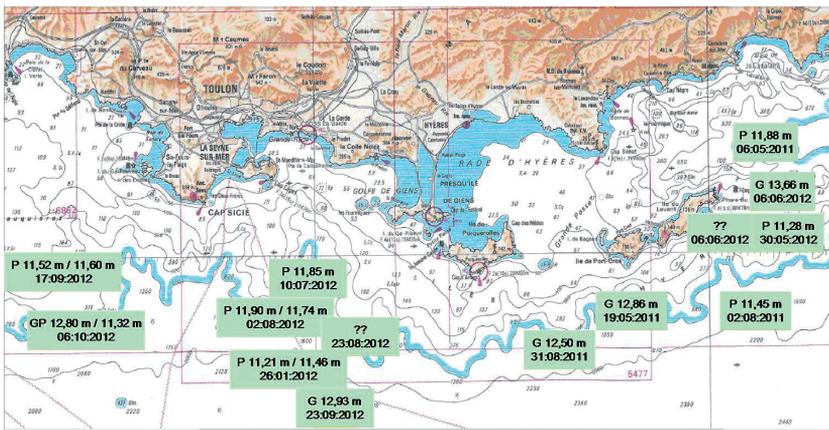


Figure 5. Fréquence de détection des cachalots au large de Toulon/Hyères d'après le Tableau I, les étiquettes vertes étant les points de détection. Les lettres G et P désignent la taille du spécimen, respectivement individu « grand » et « petit » (le « ? » indique que la taille n'est pas mesurable du fait d'un Rapport Signal sur Bruit trop faible, ou d'un échantillon trop court).

Cette étude contribue à démontrer l'intérêt de l'acoustique passive comparée à l'observation visuelle, de par la multiplication du taux de détection, la capacité de dénombrement et d'estimation de la taille. Elle a été publiée dans une conférence IEEE en 2013 (Abeille *et al.*, 2013). Cette étude a aussi permis de définir les zones propices à la pause de la bouée BOMBYX destinée à enregistrer et analyser la population de cachalots fréquentant la zone du NPC. Cette bouée a été co-financée en 2012 par le programme de la Chaire IUF Glotin et la Communauté d'Agglomération Toulon Provence Méditerranée. Elle a été posée au sud de Port-Cros en 2013, dans une zone d'accès aisé pour les plongeurs du NPC qui est partenaire de ce projet, BOMBYX. A terme BIVIP sera complété par des estimations de distance de détection pour alimenter des modèles de densité de population et de classification des cétacés (Doh Y., 2014; Halkias *et al.*, 2013), augmenter la résolution de suivi 3D par acoustique passive (Glotin *et al.*, 2007 et 2013; Giraudet *et al.*, 2006), et indexer les données en flux (Bénard *et al.*, 2010).

Actuellement aucune mesure de taille par photographie n'a pu être réalisée autour du PNPC, mais il serait intéressant à l'aide d'une caméra stéréo et/ou de modèles photogrammétriques (tels que ceux travaillés dans DYNI), de construire la loi allométrique pour ces cachalots fréquentant la Méditerranée. Cette loi devrait être différente de celles construites sur des individus fréquentant l'Océan Atlantique ou Pacifique, et elle permettrait d'établir une relation plus évidente entre la taille des individus et la composition des groupes enregistrés. Il en résulterait un meilleur suivi par acoustique passive de cette population menacée notamment par l'accroissement des nuisances anthropiques, dont les nuisances acoustiques.

Remerciements. Nous remercions le PNPC et le Sanctuaire Pelagos pour le co-financement de DECAV PELAGOS 2009-2011 n°11-031 83400 PC), son support matériel et humain (T. Houard, M. Peirache, A. Barcelo et G. Sellier). Nous remercions l'Université de Toulon (UTLN) pour le financement de la thèse de R. Abeille, la Mission Interdisciplinaire CNRS Masse de Données Scientifiques (MASTODONS) pour son soutien au projet Scaled Acoustic Biodiversity (<http://sabiod.org>), et l'Institut Universitaire de France (IUF) pour la chaire d'analyse de scène acoustique complexe 2011-16 de H. Glotin. Et merci à Pr. G. Pavan (CIBRA Univ. Pavia - Italie) pour nos discussions sur l'IPI.

Références

- ABEILLE R., GIRAUDET P., GLOTIN H. 2013. - Precise Inter-Pulse-Interval estimation in the biosonar of *Physeter Catodon* for population survey. *IEEE Int. Conf. OCOSS*.
- ABEILLE R., CHAMROUKHI F., DOH Y., DUFOUR O., GIRAUDET P., GLOTIN H., HALKIAS X., PREVOT J.M., RABOUY C., RAZIK J. 2013. - Détection et classification sur transect audiovisuel de populations de cétacés du nord Pelagos - Iles d'Or [DECAV]. Rapport du projet DECAV Pelagos N° 11-031 83400 PC, 136 p.
- ANTUNES, R. 2010. - Measuring inter-pulse intervals in sperm whale clicks : Consistency of automatic estimation methods. *J. Acoust. Soc. Am.*, 127 : 3239-3247.
- BARCELO A., BOUDOURESQUE C.F. 2012. - Rôle de la recherche dans un parc national : 50 ans de recherche dans le Parc national de Port-Cros. *Bull.Soc.Zool. Fr.*, 137 (1-4) : 11-24.
- BENARD F. GLOTIN H. 2010. - Automatic Indexing for Content Analysis of Whale Recordings & XML Representation. *EURASIP Journ.*, Sp. Issue, Advances in Signal Processing for Maritime Applications, 2010 : 8. <http://www.hindawi.com/journals/asp/2010/695017.html>
- CLARKE, M.R. 1978. - Structure and proportions of the spermaceti organ in the sperm whale. *Journal of the Marine Biological Association of the UK*, 58 : 1-17.
- DOH Y. 2014. - Système de bouée autonome et transmission pour détection & identification acoustique des cétacés - Surveillance de la biodiversité du littoral PACA & prévention des risques des activités humaines d'urbanisation des côtes. thèse de doctorat université de Toulon, soutenance prévue fin 2014.
- GIRAUDET P., GLOTIN H. 2006. - Real-time 3D tracking of whales by precise and echo-robust TDOAs of clicks extracted from 5 bottom-mounted hydrophones records of the AUTEC. *Journ. Applied Acoustics*, 67 : 11-12.

- GLOTIN H. BÉNARD F., PATRIS J. 2009. - Whale axis angle variation estimation according to click energy conservation. 4th International Workshop on Detection, Classification and Localization of Marine Mammals using Passive Acoustics.
- GLOTIN H. 2014. - Soundscape Semiotics, Localization and Categorization. *OpenBook, InTech Ed.* ISBN, 250 p. <http://www.intechopen.com/books/soundscape-semiotics-localization-and-categorization>.
- GLOTIN H., GIRAUDET P., BENARD F. 2007 et 2013. - Procédé de trajectographie en temps-réel sur ordinateur portable, de plusieurs cétacés par acoustique passive. Europe et validé aux USA. (http://sis.univ-tln.fr/~glotin/UTLN_patent_whale_USA.pdf), PCT, Nouvelle-Zélande, Canada, Australie.
- GLOTIN H., CLARK C., LECUN Y., DUGAN P., HALKIAS X., SUEUR J. 2013a. - The 1st International Workshop on Machine Learning for Bioacoustics joint to The 30th International Conference on Machine Learning (ICML 2013) Atlanta, USA. ISSN 979-10-90821-02-6, 102 p. http://sabiiod.org/ICML4B2013_book.pdf
- GLOTIN H., LECUN Y., ARTIERES T., MALLAT S., TCHERNICHOVSKI O., HALKIAS X. 2013b. - Proc. Neural Information Processing Scaled for Bioacoustics, from Neurons to Big Data. NIPS Int. Conf., Nevada, USA, ISSN 979-10-90821-04-0, 262 p. http://sabiiod.org/NIPS4B2013_book.pdf
- GORDON J.C.D. 1991. - Evaluation of a method for determining the length of sperm whales *Physeter catodon* from their vocalizations. *Journal of Zoology*, 224: 301-314.
- GROWCOTT A., MILLER B., SIRGUEY P., SLOOTEN E., DAWSON S. 2011. - Measuring body length of male sperm whales from their clicks: the relationship between inter-pulse intervals (IPI) & photogrammetrically measured lengths. *J. Acoust. Soc. Am.*, 130: 568-573.
- HALKIAS X, PARIS S., GLOTIN H. 2013. - Classification of Mysticete Sounds: Extracting spectro-temporal structures of calls using sparse architectures. *J. Acoust. Soc. Am.*, 135(5): 3496-3505. http://sis.univ-tln.fr/~glotin/Halkias_Paris_HG_DNN_bioacoustic_RBM_SAE_JASA_2013.pdf.
- LAPLANCHE C. 2005. - Etude par acoustique passive du comportement de chasse du grand cachalot. PhD thesis, Université Paris XII Val-de-Marne.
- MOHL, B., LARSEN, E., AMUNDIN, M. 1981. - Sperm whale size determination : outlines of an acoustic approach. *FAO Fisheries Series no.5*, 3: 327-332.
- PAVAN G., PRIANO M., MANGHI M., FOSSATI C. 1997. - Software tools for real-time IPI measurements on sperm whale sounds. *Underwater Bio-Sonar and Bioacoustics Symposium Proc. I.O.A.* 19, 9 : 157-164.
- TELONI V., ZIMMER W.M.X., WAHLBERG M., MADSEN P.T. 2007. - Consistent acoustic size estimation of sperm whales using clicks recorded from unknown aspects. *J. Cetacean Res. Manage*, 9: 127-136.
- ZIMMER W.M.X., MADSEN P.T., TELONI V., JOHNSON M.P., TYACK P.L. 2005a. - Off-axis effects on the multipulse structure of sperm whale usual clicks with implications for the sound production. *J. Acoust. Soc. Am.*, 118 : 3337-3345.
- ZIMMER W.M.X., TYACK P.L., JOHNSON M.P., MADSEN P.T. 2005b. - Three dimensional beam pattern of regular sperm whale clicks confirms bent-horn hypothesis. *J. Acoust. Soc. Am*, 117 : 1473-1485.

