

Partenariat scientifique 2014-2016

Université de Toulon

&

Parc national de Port-Cros

Au titre d'animateur de la Partie française de Pelagos

Sanctuaire pour les mammifères marins

&

Toulon Var-Technologie

« Visées Aériennes de Mammifères marins jointes aux Observations acoustiques Sous-marines de BOMBYX & ANTARES : nouveaux modèles en suivis et lois allométriques du *Physeter macrocephalus*, *Ziphius Cavirostris* et autres cétacés »

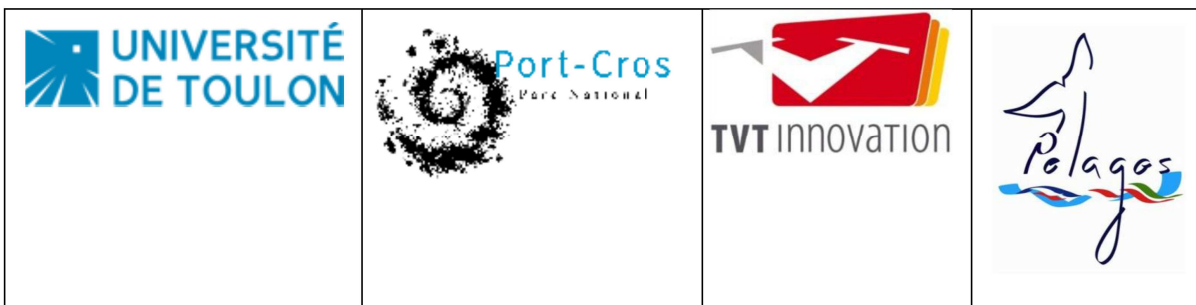
[VAMOS]

Hervé Glotin, Pascale Giraudet, Julien Ricard, Franck Malige,
Julie Patris, Vincent Roger, Jean-Marc Prévot,
Marion Poupard, Olivier Philippe*, Philippe Cosentino

DYNI CNRS LSIS - Univ. Toulon, * OSEAN SA

contact : glotin@univ-tln.fr

Contrat de Partenariat scientifique n°14-037-83400PC



Résumé

Ce projet consiste à optimiser des modèles acoustiques pour améliorer les connaissances sur *Physeter macrocephalus* (*Pm*) fréquentant le large Toulonnais, mais dont le comportement est peu connu, engendrant un risque de collision avec un trafic maritime très intense. VAMOS propose pour la première fois des modèles de localisation ou suivi 2D des sources bioacoustiques des cétacés, qui sont testés et validés sur les observations acoustiques de la zone instrumentée d'observatoires (bouée BOMBYX et collection de données du système astrophysique ANTARES). Les connaissances extraites portent sur le nombre, direction, et sens des passages.

La Bouée BOMBYX a été posée début 2014, par UTLN en collaboration avec PNPC. Elle est située 42°56 N et 6°19 E (<http://glotin.univ-tln.fr/BOMBYX>) 25 m sous-surface, 275 m au dessus du socle, en haut d'une falaise de 2 000 m de haut. La première session de BOMBYX fut monophone en juillet 2014 et permit de valider l'infrastructure et d'estimer la portée acoustique de la bouée à 10 km pour *Pm*.

Nous avons alors mi 2015 augmenté le protocole BOMBYX par un enregistrement stéréo, posé le 30 mai 2015, relevé en octobre 2015. Ce corpus de 666 Go (50 kHz Fe, 24 bits, hydrophones Neptune HN1, système Osean), est sur un programme de 10 minutes d'enregistrement et 20 minutes de pause. Les hydrophones sont fixés aux extrémités de la bouée, l'un pointant vers la surface, l'autre vers le fond, afin d'observer les plongées du cachalot, ses réflexions surface et fond.

Nous avons aussi travaillé avec les données acoustiques ANTARES de 2015. ANTARES est fixé au fond de la fosse à 20 km Ouest de BOMBYX. Nous avons travaillé avec quelques semaines d'enregistrements disponibles en 2015 essentiellement, avant le démantèlement d'ANTARES pour la pose du nouvel observatoire MEUST, que nous avons défini et codéposé au FEDER pour son volet bioacoustique que nous pilotons dès 2017. Nous présentons dans ce rapport les premières conclusions et perspectives de cette association. Nous n'avons constaté aucun recouvrement des enregistrements entre Bombyx et ANTARES 2015 sur les semaines communes, soit par problème de synchronie, soit par portée insuffisante des deux observatoires. D'autre part les mesures des réflexions du biosonar du cachalot ne s'avèrent pas aisées sur le corpus BOMBYX 2015, sa géométrie pénalise la portée de détection de l'ensemble du fait de l'orientation verticale des hydrophones.

La session 3 de BOMBYX a donc été repensée pour maximiser la portée de détection. La voie 1 et 2 regardent alors le large, les deux hydrophones parallèles dans un même plan horizontal, séparés de 1.85 m. Elle a commencé le 7 juillet, et a fini le 23 septembre 2016, générant un volume de données similaire sur une période allongée avec 5 minutes d'enregistrement toutes les 25 minutes.

Nous avons écrit un logiciel d'analyse de cette masse de données sur le supercalculateur de l'UTLN pour détecter rapidement les sources bioacoustiques de *Pm* sur les colonnes d'hydrophones d'ANTARES et sur le TeraOctet de données BOMBYX 2015 et 2016. Nous obtenons alors en moyenne sur ANTARES et BOMBYX les détections d'un cachalot tous les 3 jours, souvent par groupe de 2 ou 3. Les délais d'arrivée du signal sur l'antenne de BOMBYX montrent les défilements angulaires des animaux durant plus de 8h. Il est probable qu'ils progressent tout en gardant un contact acoustique entre eux. Il sont séparés en moyenne de 2h de nage (18 km pour une vitesse moyenne de 9 km/h d'après nos publications).

Initialement supposées de 4 km, il s'avère que la portée moyenne de détection est de 15 km, 20 km le maximum (variation suivant l'orientation de l'animal). Ces distances sont à lier avec les distances estimées inter groupe de cachalots.

Nous décrivons dans ce rapport le modèle théorique de l'antenne, et les variables observées, notamment le rapport vitesse du cachalot sur sa distance à la bouée. Les plateaux des courbes de délais d'arrivée du signal sur l'antenne varient peu. Nous pouvons en déduire que les trajectoires des cachalots sont rectilignes, et sont le plus souvent parallèles à l'antenne alignée au courant Ligure, lui même longeant le talus continental. Le cachalot a donc des trajectoires qui suivent globalement le talus.

Nous montrons que les pentes des courbes des délais d'arrivée (TDOA) au passage en zéro sont variables. Comme les animaux nagent souvent en groupe, et que la dynamique des délais est forte au sein d'un même groupe, nous posons l'hypothèse que les animaux progressent à des vitesses assez constantes, mais à des distances à BOMBYX aléatoires.

La vitesse du cachalot est analysée plus finement via la distribution des coefficients directeurs des TDOA, estimés par régression linéaire de chaque 5 minutes d'enregistrement de BOMBYX 2016. Cette distribution montre le cumul dominant des plateaux des TDOA (coefficient directeur nul) pour les passages au loin des animaux. Elle montre aussi une asymétrie avec un pic de coefficients directeurs forts pour les défilements allant d'Est en Ouest, et un déficit d'effectif à l'opposé. Il est probable que cela soit l'effet du courant Ligure (allant d'Est en Ouest), qui accélérerait la vitesse de nage dans son sens, et freinerait les autres.

La durée d'une piste est comprise entre 3h et 8h30. Les déplacements de cachalots sont légèrement favorisés dans le sens Ligure, mais l'effectif est similaire dans les deux sens. De plus les individus passent devant BOMBYX à des horaires différents, même si une tendance en milieu de journée semble se dégager (à vérifier en cumulant BOMBYX 2017). Enfin une variation de taille suivant l'IPI semble se dessiner entre 2015 et 2016, mais devra être testée sur 2017. Le Protocole BOMBYX 2017 est donc important pour acquérir des connaissances sur *Pm* et valoriser les données 2015 et 2016 qui caractérisent pour la première fois les passages de *Pm* au large de Toulon.

Enfin, nous discutons de l'intérêt de relayer les détections de *Pm* de BOMBYX en temps-réel pour un programme anti-collision. Il pourrait s'agir de transmission radio de BOMBYX, ou de placer 1 hydrophone sur l'îlot Bagaud avec transmission Wifi sur le continent. Nous avons dans cette idée interfacé sur internet et plateforme mobile un système de visualisation des comportements de la faune présenté dans ce rapport, carte pratique à terme pour les gestionnaires, le protocole de sortie en mer du PNPC et les programmes anti-collision type REPCET.

Remerciements

Nous remercions les plongeurs du Parc national de Port-Cros coordonnés par Hervé Bergère pour les premières plongées délicates sur Bombyx. Nous remercions l'équipe du protocole Bioacoustique du PNPC avec qui nous collaborons et affinons les méthodes. Nous remercions l'équipe scientifique du PNPC / Pelagos qui a permis des précisions sur cette étude, notamment Dr. Marion Peirache.

Nous remercions la PME Osean SA son directeur Olivier Philippe et Florent Fayet qui ont participé à l'instrumentation de Bombyx 2015 et 2016 et prêté leur enregistreur.

Gilles Rougier du MIO a également été moteur dans la définition technique de la bouée Bombyx.

Nous remercions Pelagos qui a financé cette étude VAMOS. Nous remercions aussi les financeurs ayant permis la pose de Bombyx : l'IUF, TPM, CG83 et UTLN.

Nous remercions Porquerolles Marine Services pour ses actions efficaces sur Bombyx et son engagement.

Le projet Bombyx a été présenté au workshop ERMITES 2016, en forme d'hackathon. Les discussions furent denses, nous remercions particulièrement Varvara Kandia, Yannis Stylianou et Gianni Pavan pour leurs discussions denses, ainsi que les autres participants.



Introduction	5
Partie A: Matériel et Corpus	5
A.1. Matériel	5
A.2. Orientations et configuration de Bombyx	7
Partie B : Détection et suivi de cachalot par acoustique	10
B1. Méthodes de détection acoustique	10
B2. Localisation de cachalots par hydrophones virtuels	11
B3. Suivi de cachalot par défilement angulaire	16
B4. Modélisation de la dynamique des délais d'arrivée des clics d'un cachalot sur Bombyx	20
a) Modèle de la dynamique du TDOA pour un mouvement rectiligne uniforme	21
b) Valeur, signe et sens de variation du TDOA	22
B5. Application à la caractérisation de la trajectoire	24
B6. Discussion sur les trajectoires	25
Partie C : Allométrie	30
C1. Définition et mesure de taille	30
C2. Relation allométrique	35
C3. Mesures photographiques	36
Conclusion	38
ANNEXES	43
REFERENCES	51

Introduction

Ce projet « VAMOS » consiste en la proposition d'un modèle de suivi dans un plan des cachalots passant au large des îles d'Or. De nouveaux modèles sont proposés pour caractériser ses défilements et augmenter nos connaissances sur *Physeter macrocephalus* (*Pm*) fréquentant les eaux du sud des îles d'Or. Le rapport présente les méthodes et résultats des objectifs suivants :

i) Produire des corpus de qualité et des modèles associés de localisation ou suivi 2D des sources bioacoustiques des cétacés dans ce milieu, en se basant sur les observations de Bombyx. Les observations ont porté sur les *Pm* à grande distance dont nous caractérisons pour la première fois les passages au large de Toulon. Nous avons testé la présence d'autres cétacés, comme la baleine de Cuvier *Ziphius cavirostris* (*Zc*) sans succès.

ii) Le matériel (carte électronique, hydrophone) est discuté et la géométrie de Bombyx améliorée pour augmenter l'autonomie et la précision des observations, notamment en ce qui concerne la densité de population.

iii) Synthétiser les résultats en terme de comptage, et trace. Interfacer sur internet pour plateforme mobile les résultats pour les gestionnaires. Proposer un protocole de suivi efficace et coordonné des cachalots, permettant à terme de compléter les mesures visuelles et acoustiques.

Partie A: Matériel et Corpus

A.1. Matériel

VAMOS couple de manière originale des observations acoustiques sur une zone que nous avons instrumentée avec différents systèmes :

a) Enregistreur d'OSEAN : L'enregistreur qui a équipé Bombyx en 2015 et 2016 est celui de la société OSEAN. Il échantillonne à 50 kHz Fe x 2 voies, 24 bits deux hydrophones HN1 Neptune (Fig. 1). Nous remercions OSEAN de son prêt, qui a permis un gain mutuel, en validant à la fois cette carte en condition terrain et le protocole Bombyx. Sa longue autonomie en mode programmé le rend efficace pour ce type de protocole.



Figure 1 : Le tube de la société Osean avec son enregistreur installé sur Bombyx en 2015 et 2016 et les deux voies équipées des HNI Neptune.

b) JASON SMIoT : Cet enregistreur a été conçu à l'UTLN par SMIoT à la suite du projet JASON de l'Axe Information Numérique Prévention (Glotin, Gies & Barchasz) (<http://sabiiod.org/smiot>). Il est destiné aux programmes bioacoustiques dont Bombyx 2017-2019. Il a été validé sur le terrain en Amazonie 2016, et le sera sur Magellan 2017, Ile Maurice 2017,18... Programmable et très robuste, il a une grande autonomie et des capacités d'échantillonnage de 1 MHz x 5 voies, 16 bits avec stockage sur HDD ou SD. Il permet la connection des hydrophones Cetacean Research CR55, CR57 et CR305, CR3, et SQ26. Il est très performant pour la mesure fine sur des odontocètes (grande vélocité). Il a été testé avec succès en Floride sur des *Tursiops* (2015) et sur les populations de *Sotalia* et Dauphins Roses d'Amazonie en été 2016 par l'équipe UTLN DYNI. Il a été présenté au congrès American Soc. Acoustics et IEEE EADM (N. Jersey) à des universitaires et sociétés leaders en monitoring bioacoustique : Cornell Univ, Austin univ., John Hopkins univ., Cairn (Australie), JASCO inc (leader Canadien en monitoring bioacoustique sous-marin), Scripps Institute. JASON sera posé mi 2017 en 4 voies sur Bombyx pour augmenter l'observation afin de répondre à la mesure de la densité de population par estimation des distances de détection comme ce rapport le préconise.

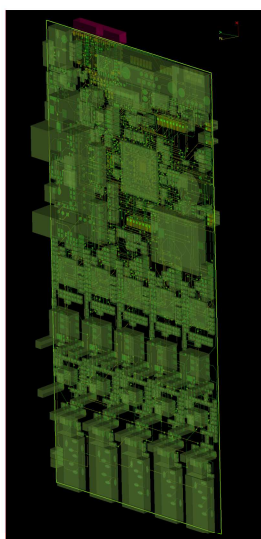


Figure 2 : La carte JASON de SMIoT UTLN TVT conçue pour le suivi bioacoustique 4 à 5 voies longue autonomie et grande vélocité, qui sera mise sur Bombyx pour les protocoles 2017-18.

Une version de JASON équipe une antenne portable pour des mesures volumiques d'émission de *Pm*, de 2 à 4 voies afin d'augmenter la qualité des modèles Biosonar et 'Inter Pulse Interval' de *Pm*. Cette antenne fut déployée sur l'île Maurice avec F. Sarano, et ces mesures inédites seront traitées dans le cadre de la thèse DGA Biosonar Glotin / Asch 2017-20. Les modèles réalisés seront ensuite utiles à l'analyse des signaux de Bombyx 2015 à 2018 pour une meilleure qualification de l'émission à la source de ces signaux.

c) Les enregistrements ANTARES : ANTARES est un observatoire astrophysique au sud de la Presqu'île de Giens, fixé par $-2\ 500$ m, relié au laboratoire LSIS par fibre optique via le serveur de l'institut Pacha à la Seyne/Mer. D'YNI LSIS est associé au consortium. ANTARES a été décrit dans le rapport du projet DECAN Pelagos 2015. Nous avons enregistré en 2015 plusieurs semaines de cachalots sur des fenêtres courtes de 10 secondes par heure, à 250 kHz d'échantillonnage. Nous avons donc constitué un corpus simultané à Bombyx 2015 sur ANTARES sur le mois de juillet 2015. En automne 2015 la ligne instrumentée ANTARES sur laquelle est montée l'hydrophone tomba en panne. Elle ne sera pas réparée, étant donné qu'ANTARES est démantelé dès fin 2016, pour laisser place à deux nouvelles lignes de l'observatoire MEUST/KM3NeT équipé d'hydrophones avec des caractéristiques supérieures à ANTARES grâce aux financements FEDER co-sollicités par D'YNI LSIS et le consortium ANTARES. D'autres hydrophones large bande formeront en 2017 une antenne qui devrait compléter les observations de BOMBYX. La définition et coordination des mesures bioacoustiques d'ANTARES et MEUST avec BOMBYX émanent des projets Pelagos DECAN et VAMOS.

d) Le protocole Bioacoustique du PNPC: ce protocole a été défini en concertation avec les projets DECAN et VAMOS ainsi que BOMBYX, afin d'en compléter les mesures. Il utilise les mêmes hydrophones CR55, une alimentation en 9V batterie avec le filtre de Cetacean Research et une cagette polyuréthane montée sur un câble de 30 m en kevlar. La numérisation est avec un TASCAM DR40 en mode dual -12 dB pour éviter toute saturation. Le niveau de gain est fixe sur tout le protocole, fréquence d'échantillonnage 96 kHz, dynamique 24 bits, linear PCM coding (.wav). Notre rapport sur les mesures 2016 de ce protocole "ACOUSTIC" conclut que la portée de détection des clics de cachalots avec ces instruments est au maximum à 20 km.

e) Observations whale watcher: ce sont des sorties bateaux supplémentaires que nous avons effectué en octobre 2015 et septembre 2016 sur La Croix du Sud avec Regard du Vivant. Un contact a été réalisé avec deux cachalots et un drone était embarqué et piloté avec autorisation par un journaliste de TF1 le 11 septembre 2016. Ces vues permettent de qualifier et affiner un protocole de mesure de taille et calibration allométrique.

A.2. Orientations et configuration de Bombyx

La Bouée Bombyx a été posée début 2014, par UTLN en collaboration avec le PNPC. Elle est située $42^{\circ}56$ N et $6^{\circ}19$ E (<http://glotin.lsis.univ-tln.fr/BOMBYX>) 300 mètres au dessus du socle, et 25 m sous la surface.

Une première série de données a été produite au premier protocole en juillet 2014 en monophone, et donna lieu à une première estimation de 10 km de portée de détection de cachalots dans la thèse de doctorat de Y. Doh (UTLN, dir. Glotin).

Nous avons augmenté le protocole Bombyx en STEREO, avec une pose le 30 mai 2015. Bombyx 2015 a été relevé en octobre 2015, et nous avons un corpus de 666 Go. La période d'enregistrement efficace est du 30 mai au 31 juillet, puis des fichiers plus courts sur août et septembre du fait de la fin d'alimentation. Les données sont à 50 kHz Fe, 24 bits, hydrophones Neptune HN1, 15 m de câble, 10 minutes d'enregistrement toutes les 30 minutes. Les fixations des hydrophones sont aux extrémités de la bouée l'un vers surface, l'autre pointant vers le fond afin d'observer les plongées du cachalot.

Une seconde session stéréo de Bombyx a été lancée le 7 juillet, jusqu'au 23 septembre 2016, pour un volume de données similaire avec des sessions de 5 minutes d'enregistrement toutes les 30 minutes. Les fixations sont sur des barres d'aluminium de 1 m en bas de la structure Bombyx par

-27 m, voie 1 à l'Est en regardant au large, voie 2 à l'Ouest, 1.85 m entre les deux hydrophones (Fig. 4), afin de mieux observer l'horizon. Nous verrons notamment que ce protocole est performant.

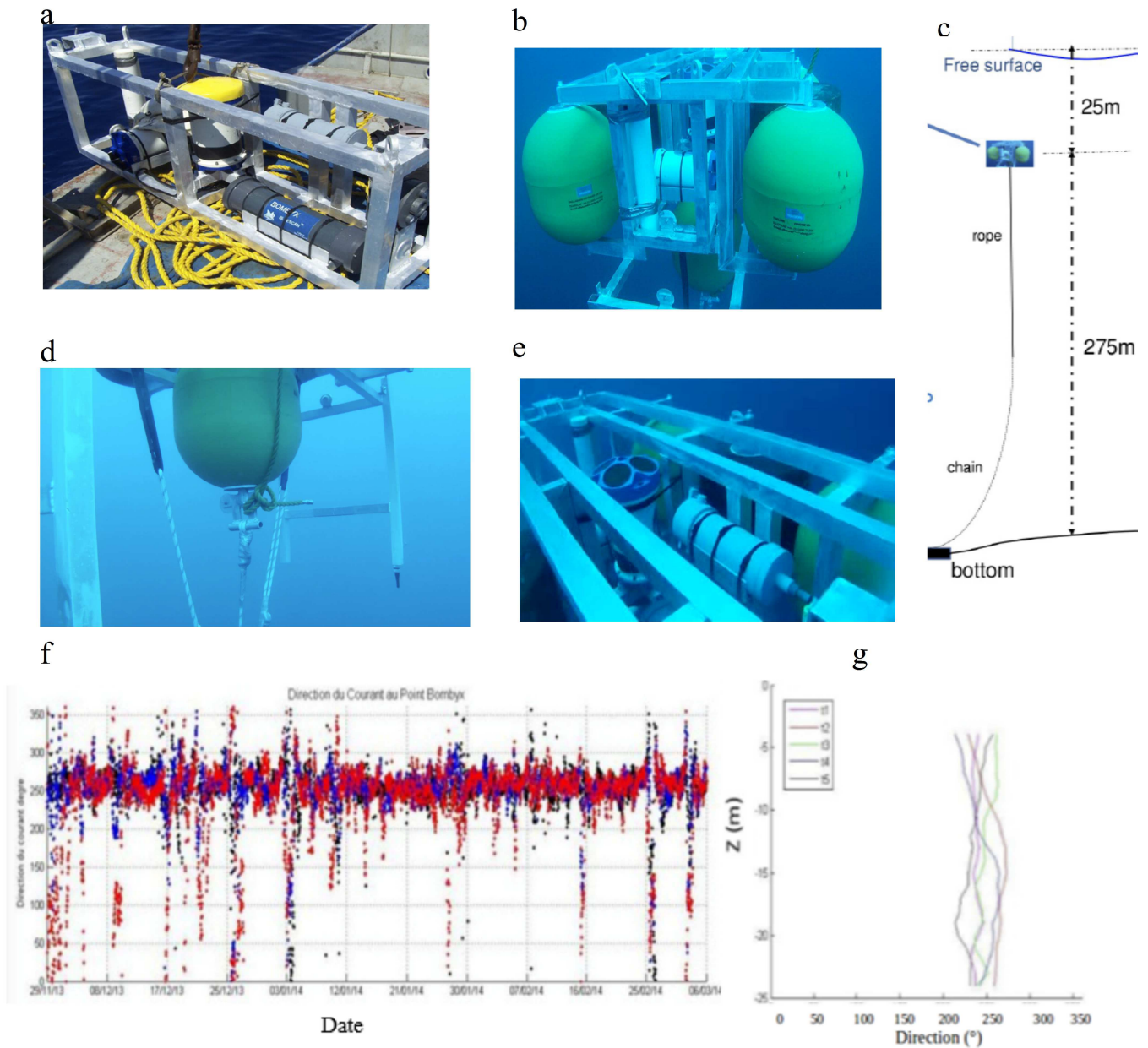


Figure 3 : de gauche à droite et de haut en bas : (a) Bombyx avant immersion en juillet 2014. (b) Première pose monophone. (c) Ancrage de Bombyx. (d) Vue de l'hydrophone. (e) Vue du courantomètre. (f et g) Relevés de directions du courant (crédit MIO dans EGU 2015) (bleu -24 m, noir -52 m, rouge -132 m) et moyenne sur 5 saisons de 2014 à 2015 : Bombyx est stable et orientée dans son axe le plus long en moyenne à 245 degrés.

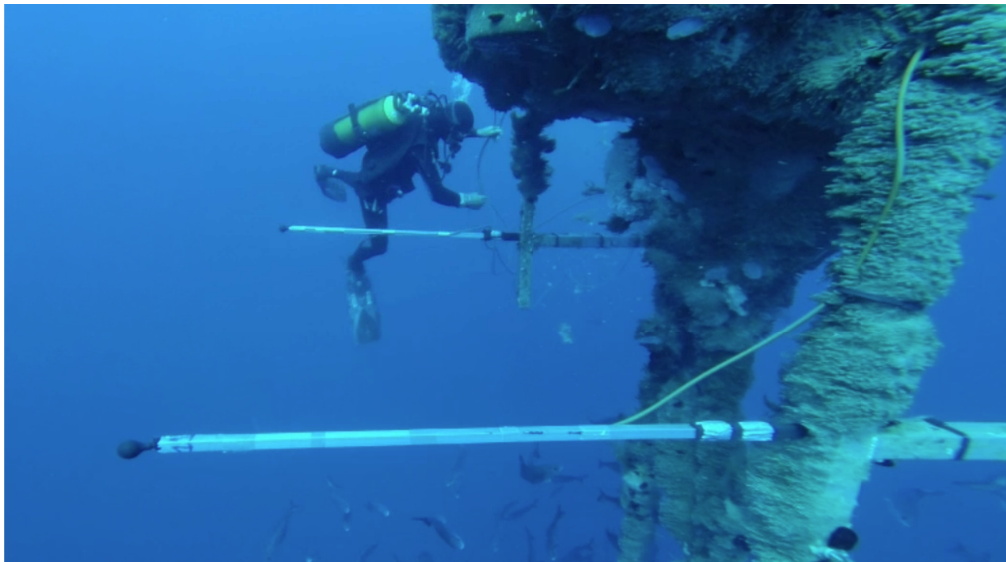


Figure 4 : configuration de Bombyx 2016. L'orientation de la bouée est assez stable, son axe principal prenant la direction 245° du courant Ligure. L'hydrophone 1 est à gauche en regardant vers le Sud (au premier plan de la photo), l'hydrophone 2 à droite (second plan). L'écart inter hydrophone égale 1.83 m, donc $|TDOA| < 1.2$ ms. Les axes des hydrophones sont horizontaux et pointent vers le large orthogonalement à 245° (photo PMS juillet 2016).

Partie B : Détection et suivi de cachalot par acoustique

B1. Méthodes de détection acoustique

Les méthodes acoustiques de VAMOS sont celles de l'état de l'art, affinées durant la première année du projet VAMOS et accélérées pour le calcul de toutes les détections sur Bombyx 2015 et 2016 (6 mois de données, 1 To, que nous aurons traité en 15 jours).

Nous avons recherché des détections de *Zc*. Une forme d'onde correspondante à *Zc* a donc été convoluée (Zimmer 2015) sur *ANTARES 2015*. Les calculs de détection ne montrent pas de contact acoustique avec cette espèce, ce qui confirmerait l'absence de détection acoustique de *Zc* pendant la période considérée sur le site comme montré dans le rapport Pelagos DECAN Glotin et al. 2015.

Au sujet de *Pm*, Doh (2014) avait montré une détection par analyse spectrale durant environ 9 h, entre midi et 21 h d'un *Pm* le 7 juillet 2014 (Fig. 5). Mais cette approche est trop longue en calcul pour être appliquée à Bombyx.

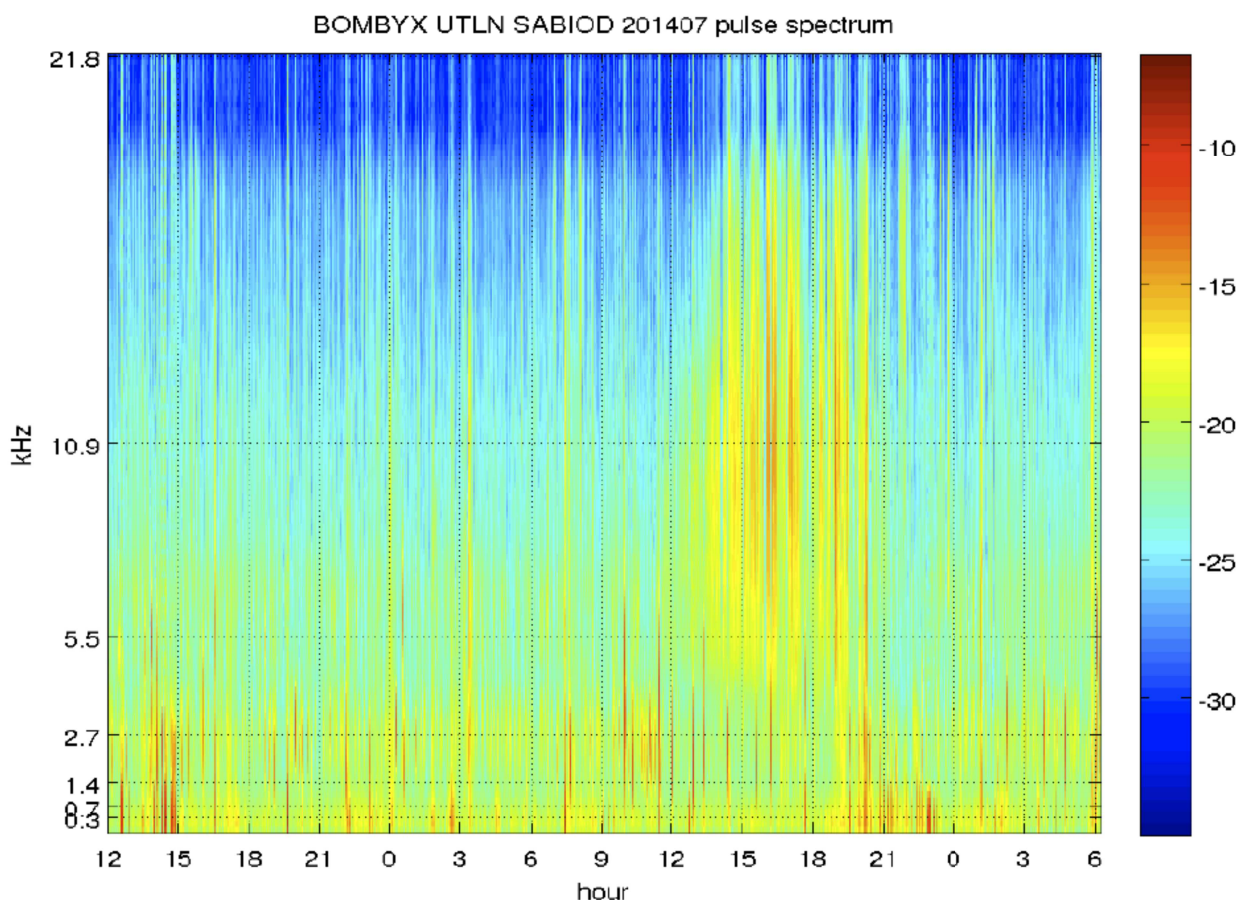


Figure 5 : Détection par analyse spectrale sur Bombyx 2015, chronophage.

Nous avons amélioré dans VAMOS un détecteur basé sur la forme d'onde, notamment efficace à faible Rapport Signal sur Bruit (RSB). Cette méthode a été initiée dans le projet DECAN Pelagos 2013-14 (Glotin et al., 2015) comme plus fiable que les analyses classiques de Fourier, plus adaptées en condition de terrain (bruit de récif, de bateaux, etc).

Nous avons affiné et accéléré les détecteurs de clics, notamment en collaboration avec l'INRIA Zenith (Approximation de recherche de séquences temporelles, équipe de F. Masegla avec qui nous continuerons de collaborer sur les données Bombyx et Meust), qui accélère par 5 les temps de recherche de forme d'onde (typiquement un IPI donné), ce qui est requis pour le traitement des corpus Bombyx (environ 300 Go par mois, 1 To / mois pour ANTARES 250 kHz Fe, 10 canaux).

Nous avons également considéré deux familles de forme d'onde, une de type Gabor et l'autre Morlet pour le cachalot, avec succès, mais toujours chronophage.

Nous avons simplifié le détecteur de seuillage sur l'enveloppe, qui a été alors codé sur le super ordinateur de l'UTLN. Nous avons récupéré environ 35 000 détections sur Bombyx 2015, et 45 000 sur 2016, ce qui valide le choix du protocole 2016. Elles sont synthétisées dans les sections suivantes.

B2. Localisation de cachalots par hydrophones virtuels

Nous avons calibré nos détections par plusieurs détections très propres de cachalots sur Bombyx. Nous pouvons par ce protocole 2015 *stéréo* estimer leur direction de passage car Bombyx a une orientation stable (celle du courant) sur l'axe (80, 260) degrés, suivant les mesures de l'ADCP (Fig. 3). En 2015, les deux hydrophones forment une antenne d'environ 3 m de large. L'intervalle de temps d'arrivée est très significatif. Nous les inversons pour estimer l'azimut et l'élévation des cachalots en utilisant les réflexions des signaux à la surface (Fig. 6 à 9).

L'intérêt de Bombyx en tant qu'observatoire stable multi-hydrophones pour la trajectographie de la faune fut ainsi démontré par cette session 2015 qui possède les deux hydrophones positionnés pour enregistrer les échos surfaces sur la voie 1, et des grands délais d'écho surface sur la voie 2 (Fig. 6). C'est une qualité de Bombyx comparée à une bouée sphérique ou de surface. Ces mesures ont été croisées et validées avec les observations ANTARES et consignées dans le rapport ACOUSTIQUE PNPC Glotin et al. d'octobre 2016 et ne sont pas reproduites ici.

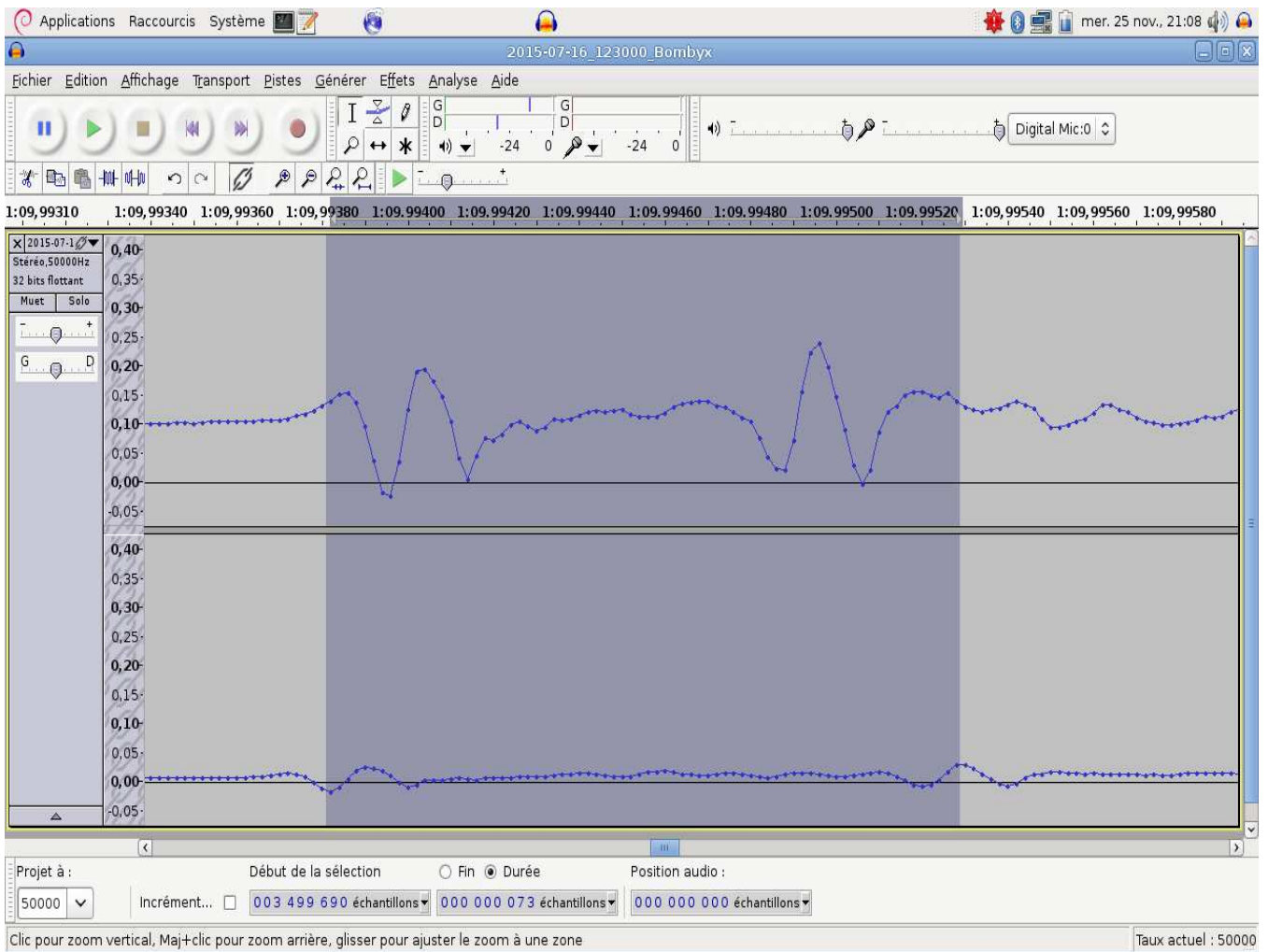


Figure 6 : Signal de Pm enregistré par Bombyx le 16 juillet 2015 à 12:30. (Haut):voie vers la surface (Bas): voie pointée vers abysses. On voit clairement l'inversion de phase due à la réflexion surface. Les réflexions sont considérées comme provenant d'un hydrophone virtuel placé au symétrique de Bombyx par rapport à la surface. Cet enregistrement est donc équivalent à 4 voies coplanaires.

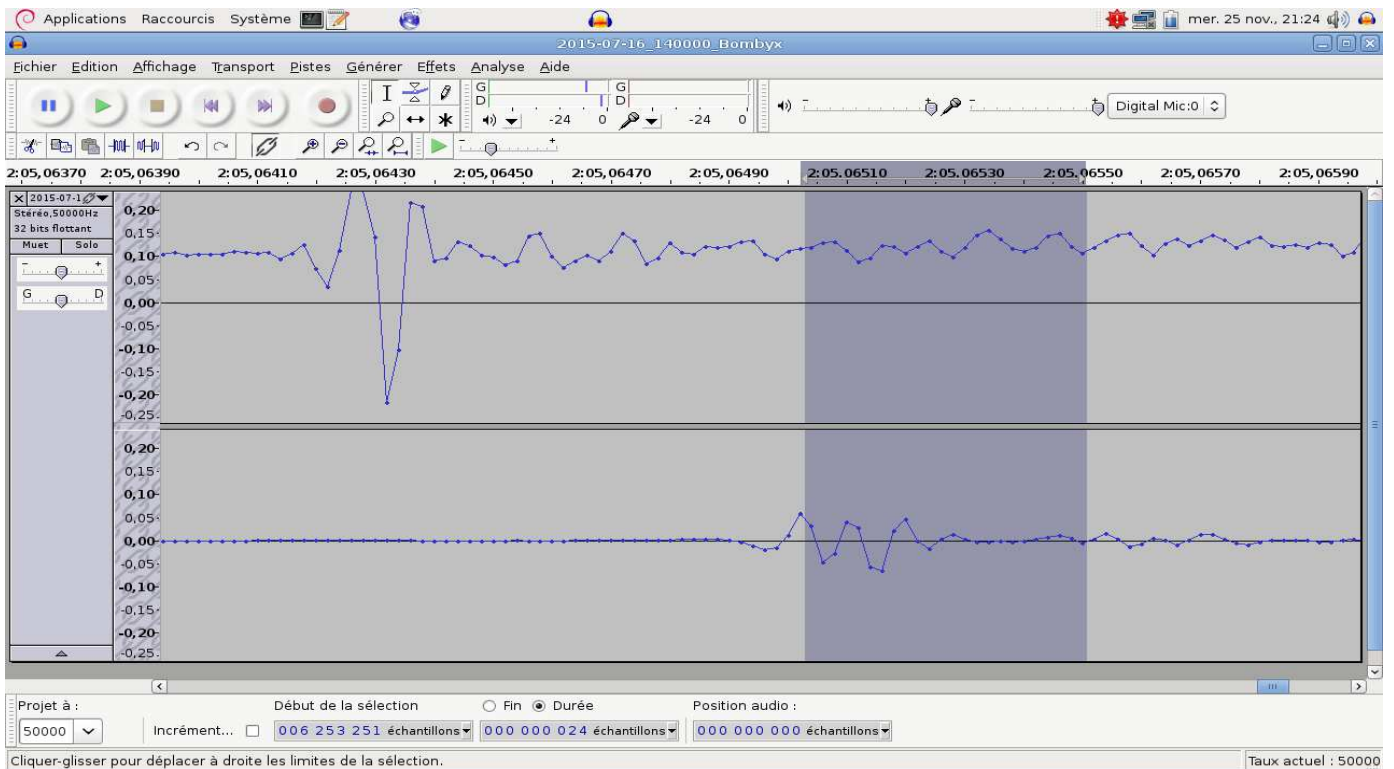


Figure 7: Signal de cachalot enregistré par Bombyx le 16 juillet 2015 à 13:00, voie vers la surface et bas voie pointée vers l'abysse. On voit l'inversion de phase sur la voie 2, due à la réflexion surface, même si les formes d'ondes sont peu marquées.

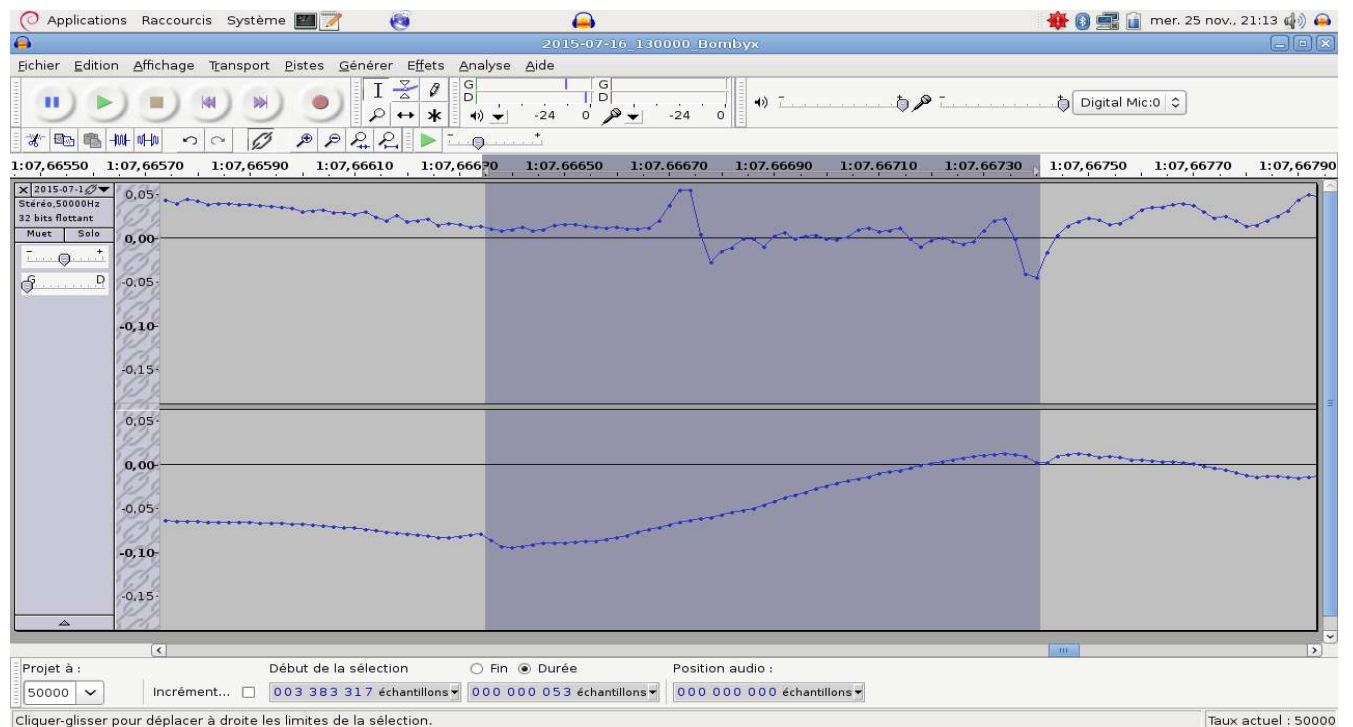


Figure 8: Signal de cachalot enregistré par Bombyx le 16 juillet 2015 à 14:00, voie du haut vers la surface, et vers le bas voie pointée vers l'abysse.

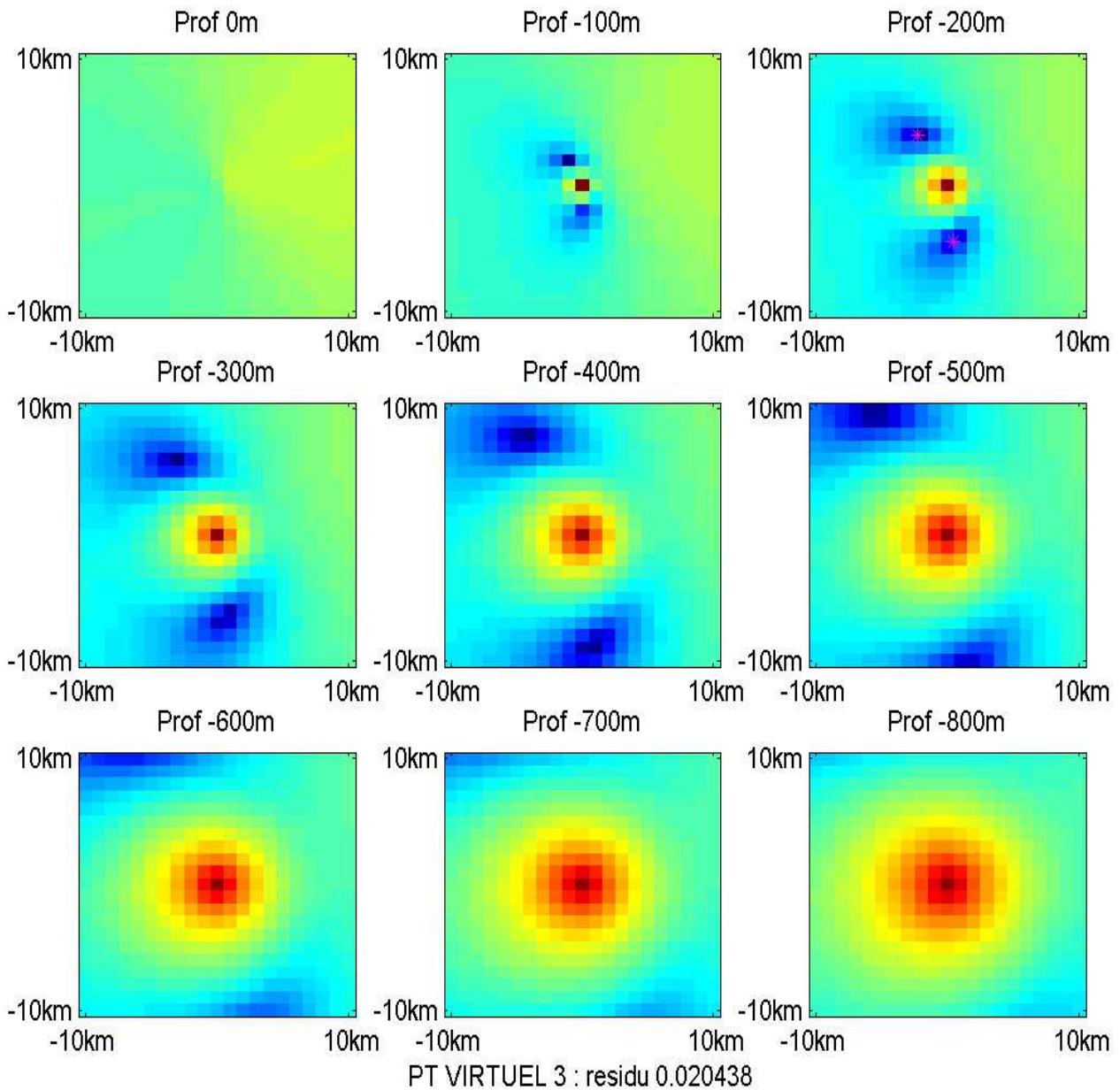


Figure 9: Illustration du résidu du calcul de la position 3D d'un des clics du 16 juillet 2015. Echelle de couleur de température : bleu = faible résidu, rouge = fort résidu. Résidu présenté par tranches de 100 mètres. Le calcul est effectué dans un cube de 10 km^3 (10 km en longitude, latitude, et profondeur). La convergence est constatée dans une zone réaliste à -200 m environ, à environ 2 km sud de Bombyx pour ce clic, et son symétrique du fait de l'ambiguïté induite par l'antenne coplanaire formée par les 2 hydrophones et leur 2 hydrophones virtuels symétriques par rapport à la surface. Cette ambiguïté est levée par la bathymétrie du site, le Nord de Bombyx étant peu fréquenté par Pm car trop peu profond (-200 m).

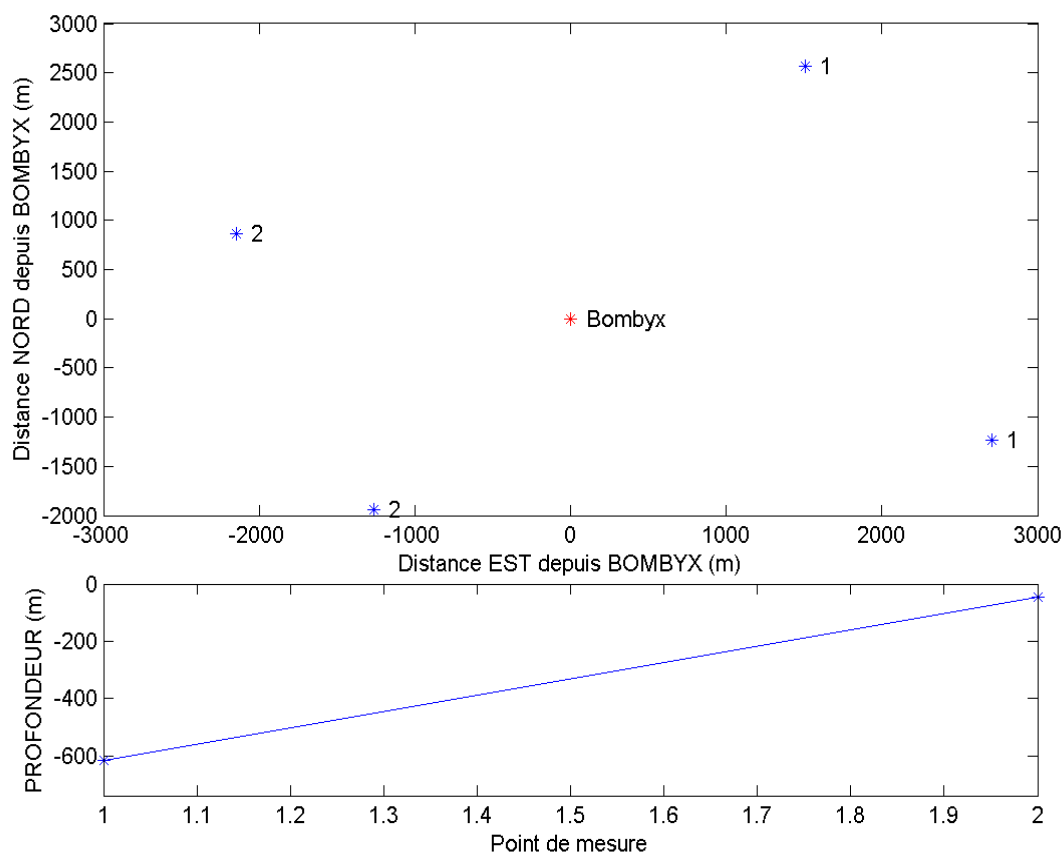


Figure 10: Localisation d'un cachalot le 16 juillet 2015 par acoustique passive sur Bombyx, par méthodes des hydrophones virtuels à 6:00 (position 1 Sud) et à 10:00 (position 2 Sud). (Haut): les positions en Est et Nord. (Bas): la profondeur. Les positions 1 et 2 sont doubles, car les hydrophones virtuels sont par définition coplanaires. Par contre nous pouvons invalider les solutions 1 Nord et 2 Nord, car elles ont une bathymétrie incohérente. En revanche - 616 m pour la position 2 est possible pour la solution Sud.

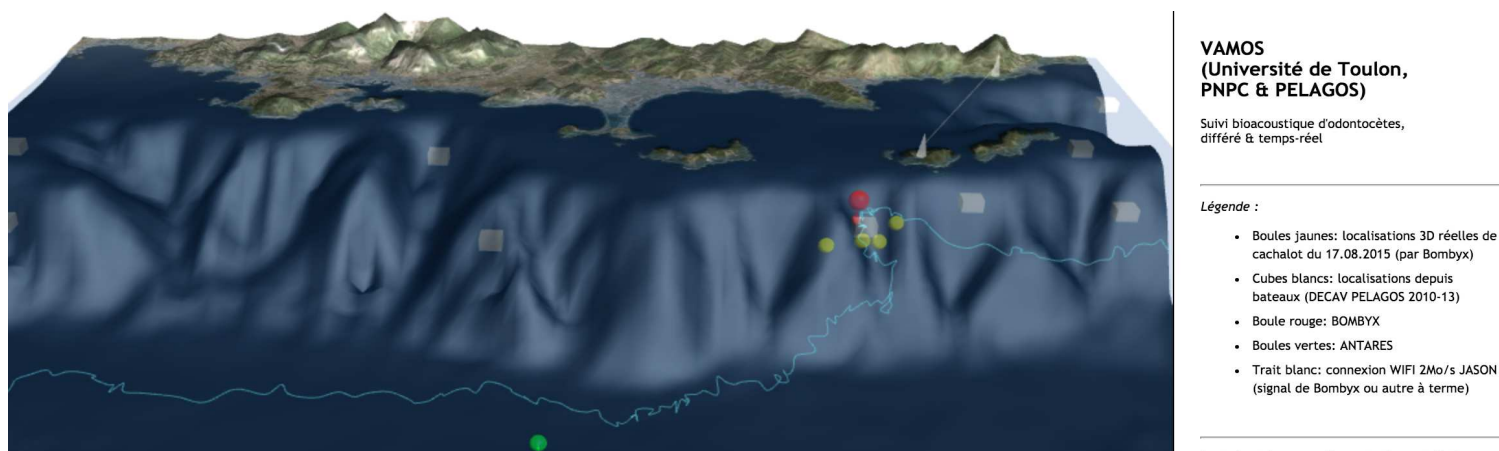


Figure 11: Localisation de clics détectés le 16 juillet 2015 (points jaunes), Bombyx (point rouge).

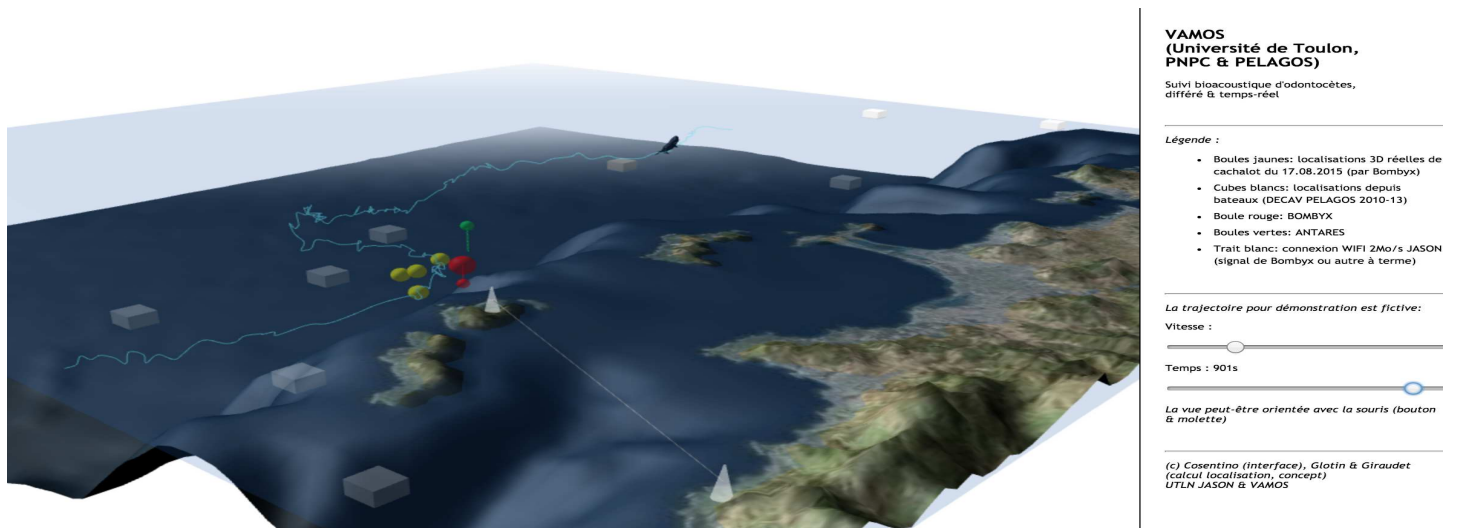


Figure 12: idem que Fig. 11, mais sur l'interface 3D VAMOS, vues depuis Sud et depuis Nord Est. Ce système est construit en HTML5 pour Android / Google Chrome / Firefox, et disponible sur <http://sis.univ-tln.fr/~glotin/SABIOD/VAMOS>

Boule rouge : Bombyx ; jaunes : positions du cachalot ; ligne et mats blancs : transmission wifi de 18 km établie le 20 octobre 2015 et qui permettra à terme la transmission de signal vers les calculateurs. En ce sens un point d'instrumentation supplémentaire serait idéal sur le SO de Port-Cros, car cette mesure acoustique serait alors transmise en direct vers le continent, et les calculateurs de l'UTLN, permettant d'alimenter un système d'alerte anti collision entre ferry et cétacés.

B3. Suivi de cachalot par défilement angulaire

Le suivi sur Bombyx est par la suite simplifié par une simple mesure de corrélation des deux hydrophones. Un délai négatif sur Bombyx 2016 indique une position à l'Est. Le délai nul indique une position dans le plan médian des hydrophones. La méthode est très efficace et permet de dresser sur les 5 mois de mesure les pistes des cachalots. Nous en présentons ici des exemples.

Pistes de cachalots détectées entre le 07 et 15 juillet 2016
(délais entre l'hydrophone 1 (Est) et 2 (Ouest) en millisecondes, en fonction du temps en heure)

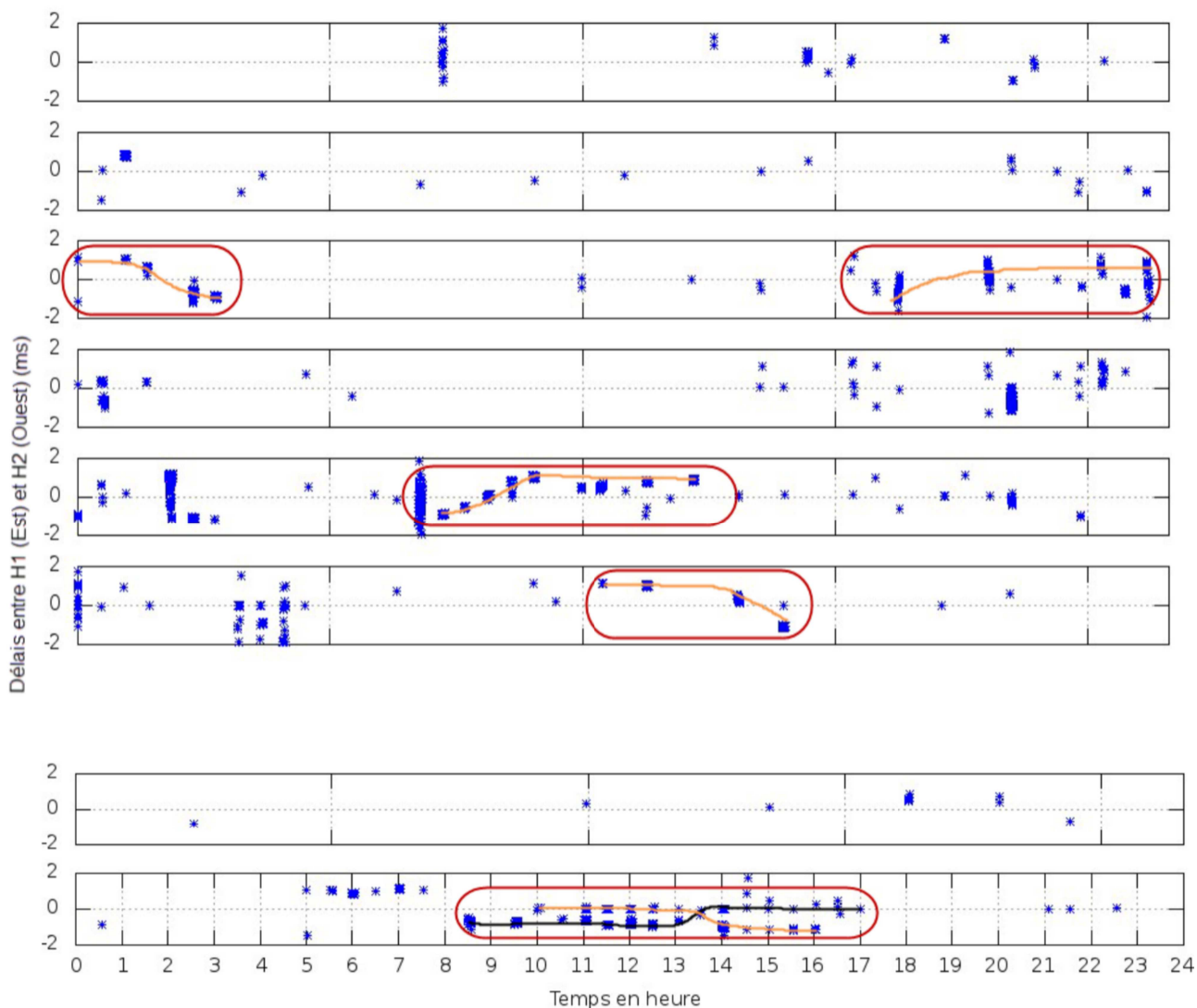
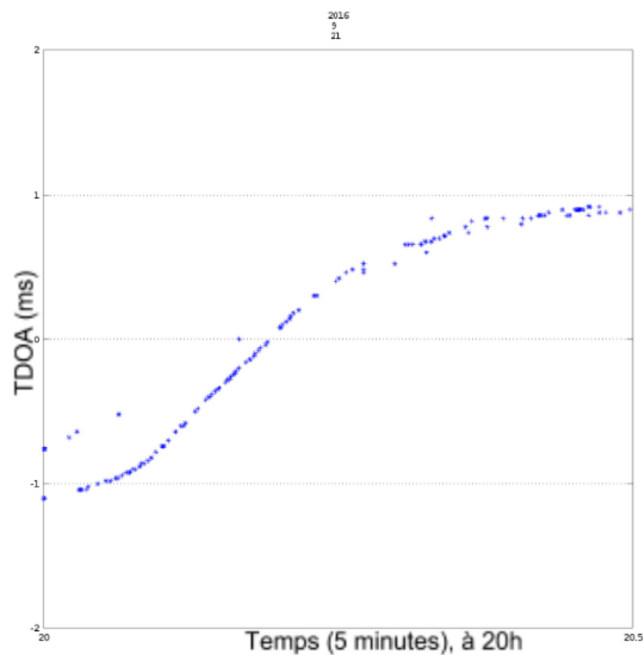


Figure 2 : Pistes de cachalots détectées entre le 07 et 15 juillet 2016
(délais entre l'hydrophone 1 (Est) et 2 (Ouest) en millisecondes, en fonction du temps en heure)

Figure 13: Exemple de pistes de Pm extraits par Bombyx, une ligne par jour, du 7 juillet (haut) au 15 juillet (bas). Le 13 juillet, il n'y a pas de détection, la 7^{ème} ligne est donc vide.

Les figures 13, 14, 15 représentent des délais de clics de cachalot(s) sur Bombyx 2016. Elles intègrent toutes les détections automatiques sur plusieurs heures, par tranches de 5 minutes séparées de 25 minutes (d'où les coupures). L'ordonnée est le délai d'arrivée du signal entre hydrophones Ouest et Est. Il est positif si le signal arrive avant sur l'hydrophone Est (voie 1).

a)



b)

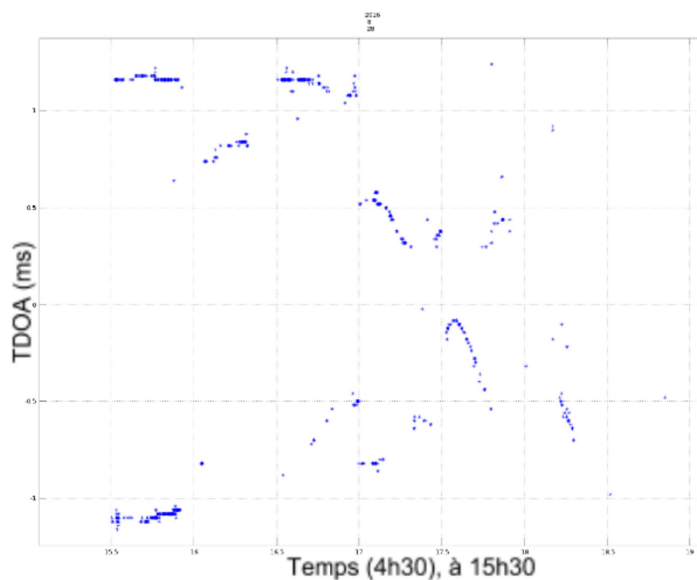


Figure 14: (a) Délai d'arrivée de clics d'un cachalot sur BOMBYX en fonction du temps, sur 5 minutes. Le 21 septembre 2016, 20:00. La forme est très caractéristique (voir section modèle). (b) Idem mais le 28 août 2016, à 15:30 et sur 4h30 de mesures. Deux cachalot semblent présents : un cachalot provenait de l'Est (délai positif) et l'autre de l'Ouest (délai négatif) et se sont retrouvés dans le plan médiateur des deux hydrophones (délais nul). Les points sont donnés pour chaque détection de cachalot sans post traitement. Les détections sont données en continu, par tranches de 5 minutes séparées de 25 minutes (d'où les coupures).

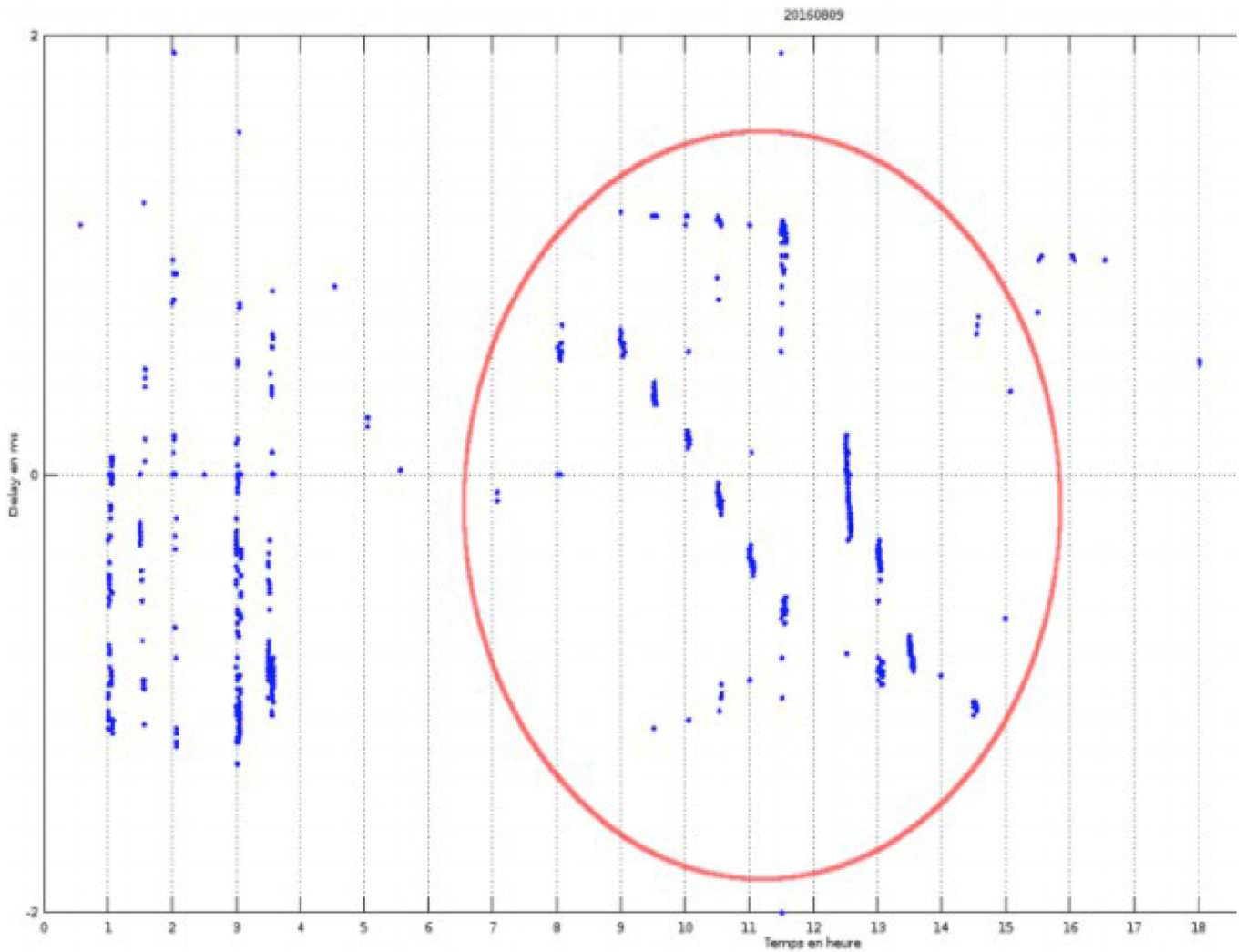


Figure 15: Tracé compressé des détections de cachalot du 9 Août 2016. En abscisse 18h de mesure de 5 minutes toutes les 25 min. Délais d'arrivée (TDOA) en ordonnée entre $-+2$ ms. On met en évidence 2 pistes propres, donc deux cachalots nageant ensemble, en contact donc, séparés de 2h de nage (20 km si vitesse de 10km/h, ce qui rend encore possible un contact acoustique entre eux). A noter que les plateaux des courbes sont différents. Voir la partie modèle. La pente (dérivée) du TDOA en 0 est aussi différente. Nous verrons dans la partie suivante que cette pente est liée au rapport vitesse / distance à Bombyx. Comme ils nagent ensemble, donc à même vitesse, il est plus probable qu'il s'agisse de l'effet de distances différentes à Bombyx.

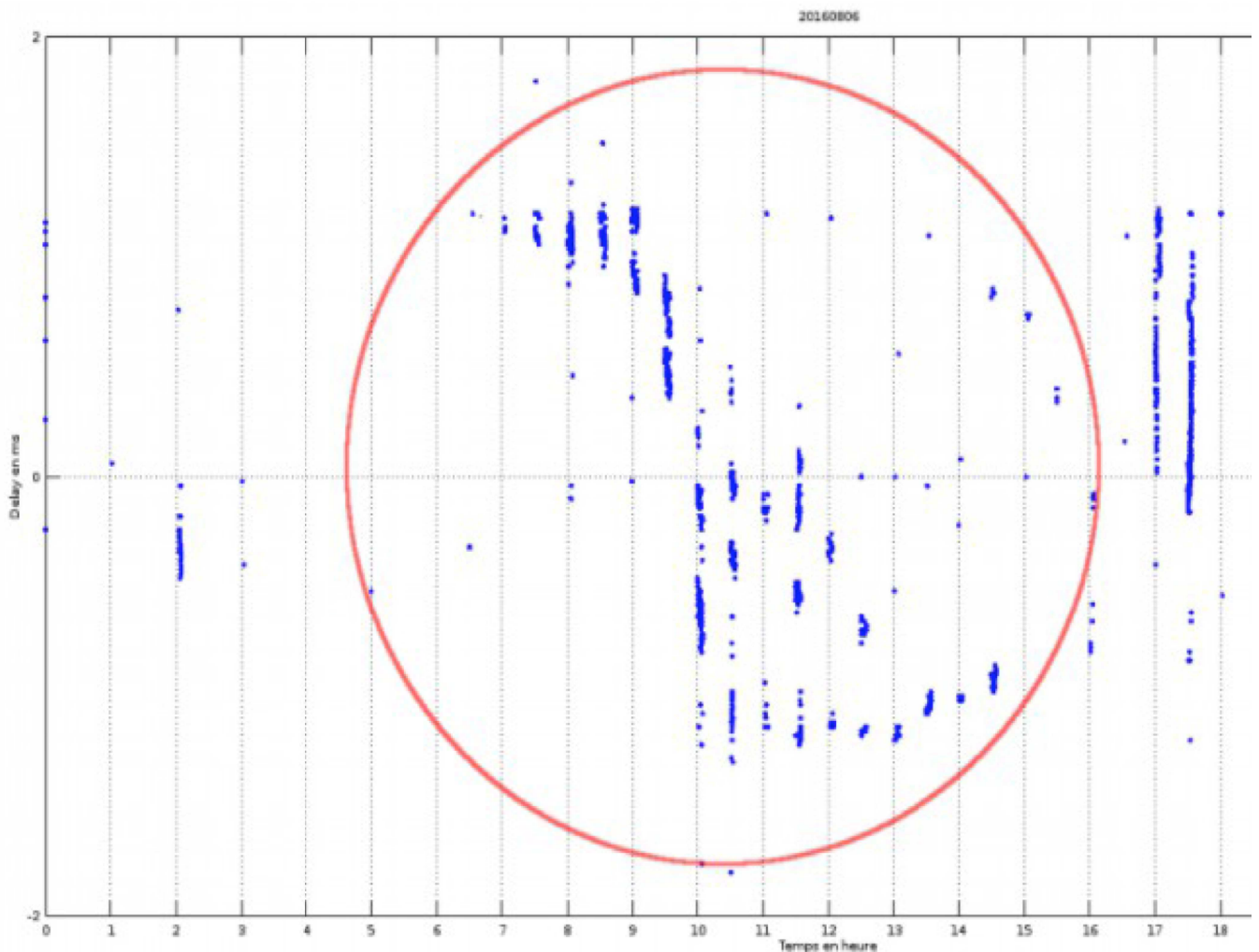


Figure 16 : Tracé compressé des détections de Cachalot du 6 Août 2016. En abscisse 18h de mesure de 5 minutes toutes les 25 minutes. Délais d'arrivée (TDOA) en ordonnée entre ± 2 ms. On voit deux à trois pistes (une par individu) qui se séparent vers 11:00. Leur plateau de 6:00 à 9:00. Les 2 ou 3 cachalots nageant ensemble, car il est peu probable qu'ils se groupent spécifiquement en face de Bombyx, ils se distancent de 1h30 de nage (cf les distance au passage en zéro), ce qui représente 15 km de distance s'ils nagent à 10 km/h (Giraudet et al., 2008). Cette distance assurerait le maintien d'un contact acoustique entre eux.

B4. Modélisation de la dynamique des délais d'arrivée des clics d'un cachalot sur Bombyx

Dans les sections précédentes, nous avons démontré que la bouée Bombyx permet d'enregistrer en continu et en stéréo les clics d'écholocation des cachalots croisant au large de Toulon, avec une portée de 15 km à 20 km environ. Tous les enregistrements de 2015 et 2016 ont été traités pour détecter et mesurer automatiquement les délais d'arrivée des clics sur les deux hydrophones (TDOA) grâce au mésocalculateur de l'Université de Toulon, qui a permis de traiter en 15 jours de calculs intensifs près de 1To de sons, correspondant aux 6 mois d'enregistrements stéréo.

Ces calculs fournissent donc l'évolution au cours du temps des TDOA des émissions de chaque cachalot se déplaçant dans un rayon d'une vingtaine de km au large de Bombyx. Quelles

informations sur la position et la trajectoire du cachalot peut-on extraire de cette dynamique des TDOA ?

Pour répondre à cette question, nous présentons ici une première modélisation de la dynamique des TDOA mesurés par Bombyx pour différentes trajectoires rectilignes d'une source sonore. Nous appliquons ensuite ce modèle sur les mesures de Bombyx et dressons finalement les premières statistiques sur les trajectoires des cachalots croisant au large de Toulon, ouvrant ainsi des perspectives pour le suivi des populations de cachalot et les programmes anti-collisions.

a) Modèle de la dynamique du TDOA pour un mouvement rectiligne uniforme

Nous étudions ici la famille de courbes TDOA en fonction du temps pour différentes trajectoires de la source sonore, que nous supposons rectilignes, avec une vitesse constante.

Hypothèses : Trajectoire rectiligne, mouvement uniforme (vitesse constante v) de la source.

Notations : H1 et H2 les deux hydrophones,
 c la vitesse du son dans l'eau (1500 m/s),
 (O,i) la trajectoire de la source sonore,
 (O,j) la droite perpendiculaire à (O,i) passant par H1,
 $t=0$ la date de passage de la source au point O.

$S(t)$ la position de la source au temps t ,
 (O,i,j,k) le repère orthonormé,
 Les coordonnées dans ce repère de H1 sont $(0,d,0)$; H2 $(x,d+y,z)$; $S(t)$ $(vt,0,0)$.

Ces notations sont représentées Fig. 17.

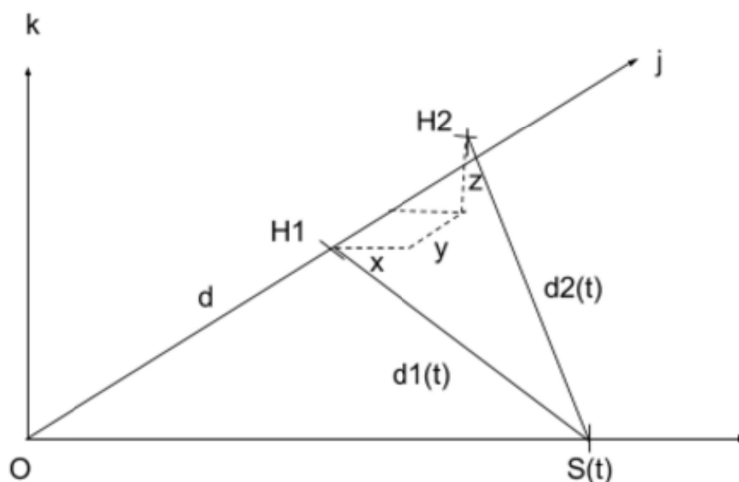


Figure 17: Représentation des caractéristiques de la trajectoire de la source par rapport à la position des deux hydrophones

Nous résumons ci-dessous le calcul des informations sur la trajectoire fournie par la courbe TDOA(t).

b) Valeur, signe et sens de variation du TDOA

Les propriétés des courbes sont les suivantes :

- La valeur absolue du TDOA est toujours inférieure à un seuil h/c où h est la distance entre les hydrophones H1 et H2.
- Lorsque $\text{abs}(\text{TDOA}) = h/c$, la trajectoire coupe la droite (H1,H2) (cas rare en 3 dimensions).
- Lorsque $\text{abs}(\text{TDOA})$ atteint son maximum, la trajectoire est au point le plus proche de la droite (H1,H2) : point A.
- Lorsque $\text{TDOA} = 0$, la trajectoire coupe le plan médian de H1 et H2 (point B)
- Si $\forall t \text{ TDOA}(t) > 0$ (resp < 0), la trajectoire est perpendiculaire à (H1,H2) et la source reste toujours plus proche de H1 (resp H2)
- Quand le signe du TDOA change, la trajectoire traverse le plan médian de H1 et H2
- Lorsque le TDOA est monotone, la trajectoire est parallèle à la droite (H1,H2)

Limites de TDOA(t) en $\pm\infty$

$$TDOA(t) = \frac{|vt|}{c} \left(\sqrt{\left(1 - \frac{x}{vt}\right)^2 + \left(\frac{d+y}{vt}\right)^2 + \left(\frac{z}{vt}\right)^2} - \sqrt{1 + \left(\frac{d}{vt}\right)^2} \right)$$

Lorsque $t \rightarrow \pm\infty$, $\frac{1}{v^2 t^2} \ll \frac{1}{vt} \ll 1$ donc $TDOA(t) \simeq \frac{|vt|}{c} (\sqrt{1 - \frac{2x}{vt}} - 1)$

Développement limité en 0 de $\sqrt{1+x} = 1 + \frac{x}{2} - \dots$

donc lorsque $t \rightarrow \pm\infty$, $TDOA(t) \simeq \frac{|vt|}{c} (1 - \frac{x}{vt} - 1) \simeq - \text{signe}(vt) \times \frac{x}{c}$

$\lim_{t \rightarrow \pm\infty} TDOA(t) = - \text{signe}(vt) \times \frac{x}{c}$	(e2)
--	------

Les limites du TDOA en $\pm\infty$ dépendent donc de x , la différence de coordonnées entre H1 et H2 sur la trajectoire de la source, donc l'angle de la trajectoire par rapport à l'axe des hydrophones.

Dérivée en 0 de TDOA(t) (point O)

$$TDOA(t) = \frac{1}{c} \left(\sqrt{(vt-x)^2 + (d+y)^2 + z^2} - \sqrt{v^2t^2 + d^2} \right)$$

donc

$$TDOA'(t) = \frac{v}{c} \left(\frac{vt-x}{\sqrt{(vt-x)^2 + (d+y)^2 + z^2}} - \frac{vt}{\sqrt{v^2t^2 + d^2}} \right)$$

$$\text{donc } TDOA'(0) = \frac{v}{c} \frac{-x}{\sqrt{x^2 + (d+y)^2 + z^2}} \simeq -\frac{vx}{cd}$$

$$TDOA'(0) \simeq -\frac{vx}{cd}$$

La dérivée en 0 du TDOA dépend donc de v , x , c et d . Si on connaît x , la pente du TDOA au point le plus proche des hydrophones donne v/d , le rapport de la vitesse du cachalot à sa distance aux hydrophones.

Dérivée en t_0 de TDOA(t), t_0 étant la date du passage en zéro du TDOA (point B)

Si x et y tous deux non nuls, $x^2+y^2+z^2$ négligeable devant $2dy$, donc :

$$TDOA(t_0) = 0 \Leftrightarrow t_0 = \frac{x^2+y^2+z^2+2dy}{2vx} \Leftrightarrow t_0 \simeq \frac{dy}{vx}$$

Donc

$$TDOA'(t_0) \simeq \frac{v}{c} \left(\frac{dy/x-x}{\sqrt{(dy/x-x)^2+(d+y)^2+z^2}} - \frac{dy/x}{\sqrt{d^2y^2/x^2+d^2}} \right)$$

$$TDOA'(t_0) \simeq \frac{v}{c} \left(\frac{dy/x-x}{\sqrt{\frac{d^2y^2}{x^2}+d^2+x^2+y^2+z^2}} - \frac{dy/x}{\sqrt{\frac{d^2y^2}{x^2}+d^2}} \right)$$

$$TDOA'(t_0) \simeq \frac{v}{c} \left(\frac{dy/x-x}{\sqrt{\frac{d^2y^2}{x^2}+d^2}} - \frac{dy/x}{\sqrt{\frac{d^2y^2}{x^2}+d^2}} \right)$$

$$TDOA'(t_0) \simeq \frac{-vx}{c\sqrt{\frac{d^2y^2}{x^2}+d^2}}$$

$$TDOA'(t_0) \simeq - \frac{vx}{cd\sqrt{1+\frac{x^2}{y^2}}}$$

La dérivée du TDOA au point où TDOA=0 permet d'estimer la coordonnée y grâce au rapport v/d.

B5. Application à la caractérisation de la trajectoire

On estime donc le ratio v/d et l'angle de la trajectoire par rapport à la géométrie de BOMBYX (grâce à x et y) en fonction des mesures du TDOA limite sur les plateaux, de la dérivée du TDOA en t=0, et de la dérivée du TDOA en t0 (temps où s'annule le TDOA).

$$x = -c \cdot \lim(t \text{ inf}) TDOA(t) = -c \cdot L$$

$$v+dcx TDOA'(t=0) = -TDOA'(t_0) / (L * 1500)$$

$$x^2/y^2 = (TDOA'(0)/TDOA'(t_0))^2 + 1$$

Il en résulte la famille de courbe de TDOA illustrée Fig. 18.

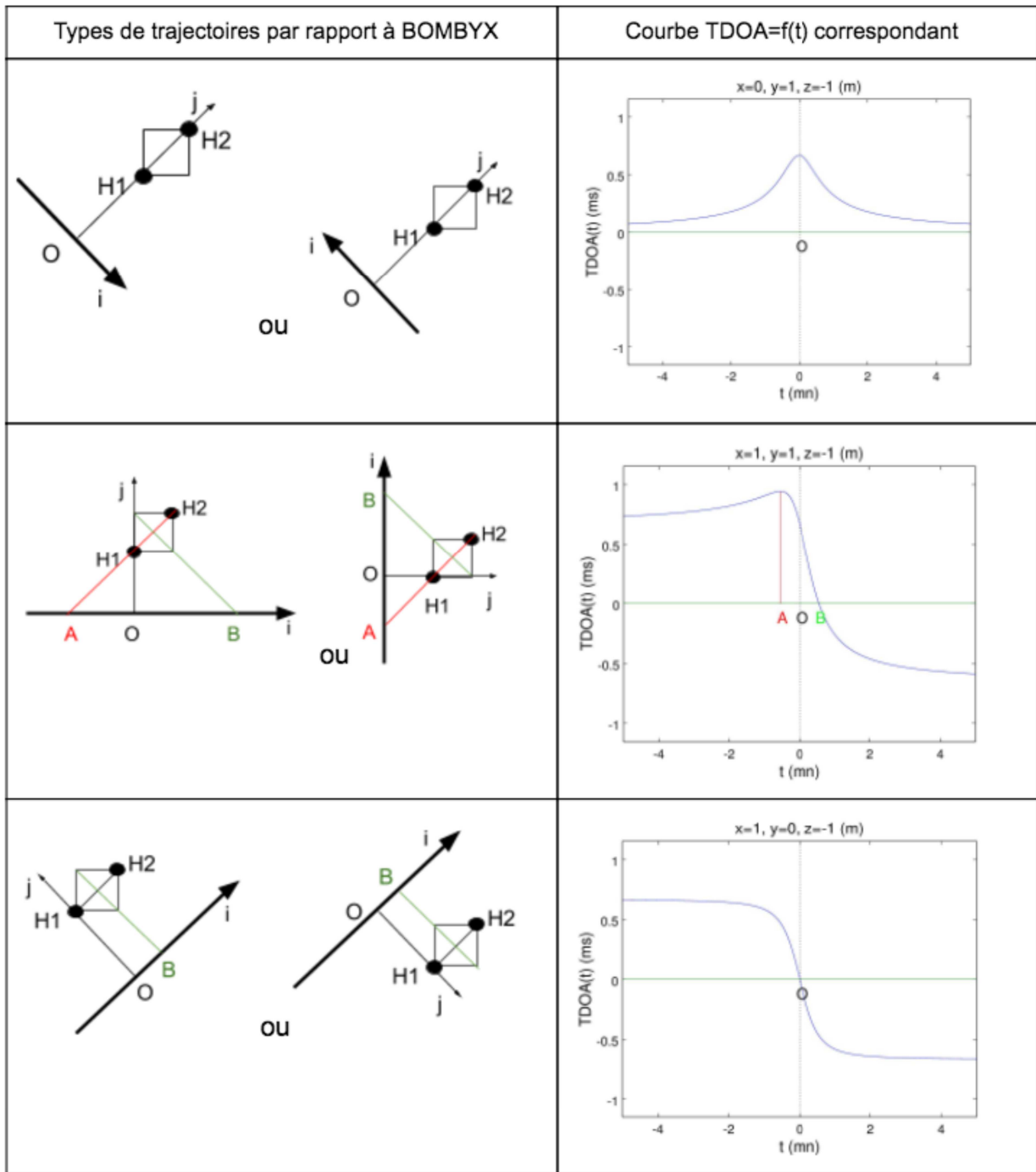


Figure 18: Allure des courbes $TDOA=f(t)$ pour différentes trajectoires de la source. A gauche : trajectoire (O,i) de la source par rapport aux hydrophones $(H1,H2)$ de Bombyx (échelle non respectée); A représente le point de la trajectoire le plus proche de la droite $(H1,H2)$ correspondant à un extremum dans le TDOA, et B représente l'intersection de la trajectoire avec le plan médian de $[H1,H2]$, correspondant à un TDOA nul. A droite la courbe générée par le modèle, montrant les trois courbes typiques, de haut en bas : en cloche (rare), et en forme de sigmoïde avec ou sans rebond.

B6. Discussion sur les trajectoires

Nous donnons en annexe les détails des points et limites remarquables. L'inspection de toutes les pistes sur les cinq mois montre que :

La plupart des courbes observées sur Bombyx sont de type sigmoïde (Fig. 13 à 16 et annexe), le passage de l'animal est donc majoritairement tangent ou légèrement incliné par rapport à l'axe des hydrophones : les cachalots semblent longer le talus ou les lignes iso-bathymétriques.

Il existe quelques pistes qui sont en forme de cloche comme le modèle le prédit, ce qui correspond donc à une trajectoire orthogonale à l'axe des hydrophones, et donc à un passage de l'animal à priori entre Porquerolles et Port-Cros. Un tel exemple est mesuré le 1^{er} aout 2016 à 3:00 du matin (Fig. 19).

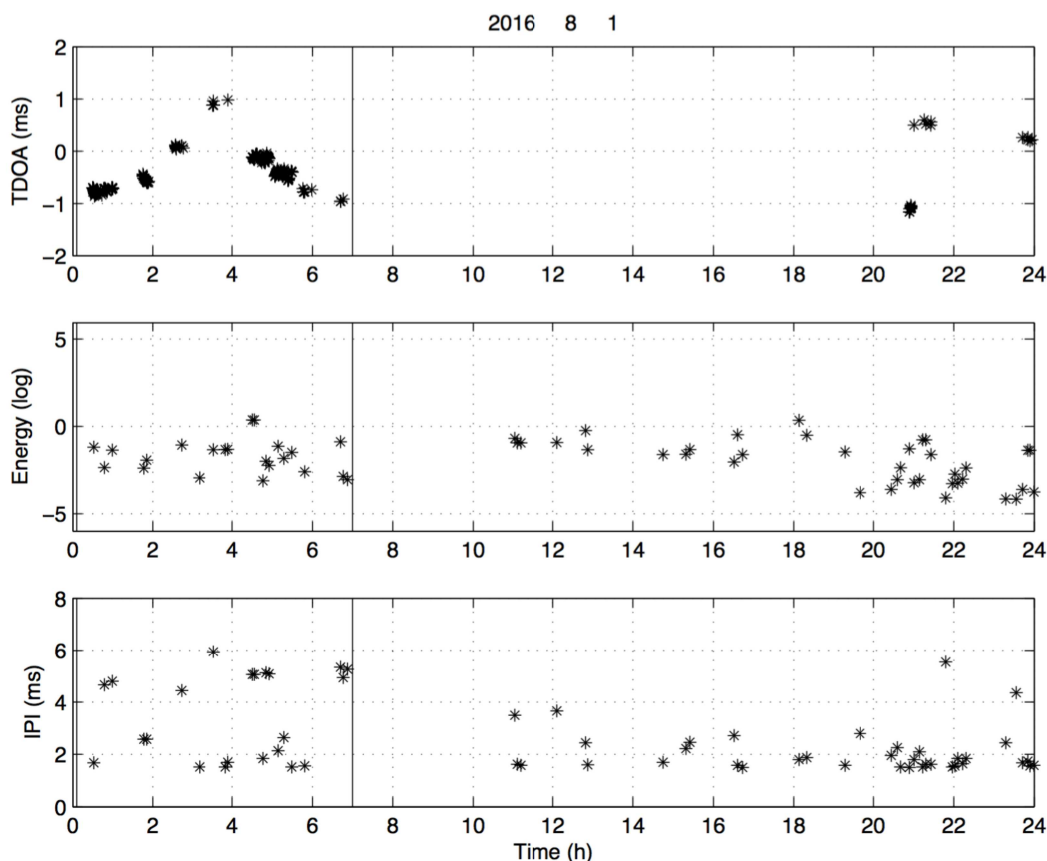


Figure 19: trajectoire du 1^{er} aout 2016 à 3:00 en forme de cloche comme le modèle le prédit, correspondant à une trajectoire orthogonale à l'axe des hydrophones, et donc à un passage de l'animal à priori entre Porquerolles et Port-Cros. Cette représentation donne également les énergies (log10 de la somme des échantillons au carré) et les IPI en ms. Le point le plus proche étant le sommet de la cloche, l'IPI le plus fiable serait 6 ms. D'autres exemples sont donnés en annexe.

Nous avons décrit le modèle théorique de l'antenne, et décrit les variables observées, notamment le rapport vitesse du cachalot sur sa distance à la bouée. Les plateaux des courbes de délais d'arrivée du signal sur l'antenne varient peu. Nous pouvons en déduire d'après le modèle que les trajectoires des cachalots sont rectilignes, et sont le plus souvent parallèles à l'antenne alignée au courant Ligure, lui même longeant le talus continental. Le cachalot aurait donc des trajectoires qui sont globalement parallèles au talus.

La durée d'une piste est comprise entre 3h et 8h30. Les individus ne semblent pas tous emprunter le même chemin (on note des pentes en 0 variables donc les distances à Bombyx sont variables).

D'après nos résultats sur les 5 mois de 2016, nous avons observé des déplacements de cachalots sans préférence d'orientation autre que tangente au talus (défilement TDOA fort).

De plus, les individus passent devant Bombyx à des horaires différents, même si une légère tendance en milieu de journée semble se dégager (à vérifier en cumulant Bombyx 2017 dans un projet suite à VAMOS).

Le modèle montre que la pente des courbes est une fonction de v/d . Nous dressons donc la distribution des pentes de 2016 (Fig. 20). Il indique une accélération des nages de cachalots dans le sens du courant Ligure (et inversement, un ralentissement dans l'autre sens). Cette tendance sera à confirmer sur Bombyx 2017 et suivant.

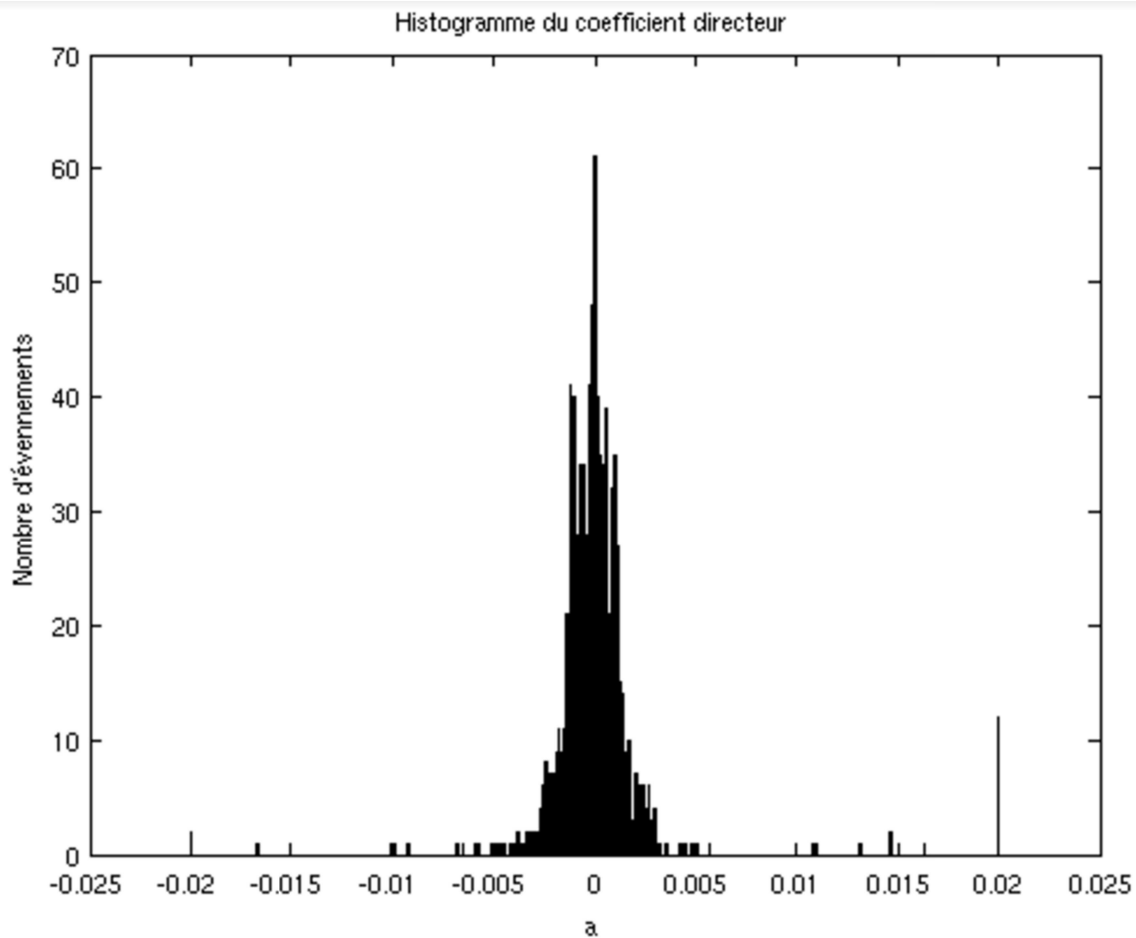


Figure 20: Histogramme de tous les coefficients directeurs a mesurés par régression linéaire sur chaque 5 minutes. C'est donc un cumul des plateaux ($a=0$) et des passages en TDOA=0. $a > 0$ pour piste allant d'Est en Ouest, c'est à dire dans le sens du courant Ligure. On voit un pic pour $a = -0.001$ ms/s, et un creux à l'opposé. a étant fonction de v/d , il est probable que l'on mette en évidence l'effet du courant Ligure allant d'Est en Ouest qui modulerait les vitesses de nage.

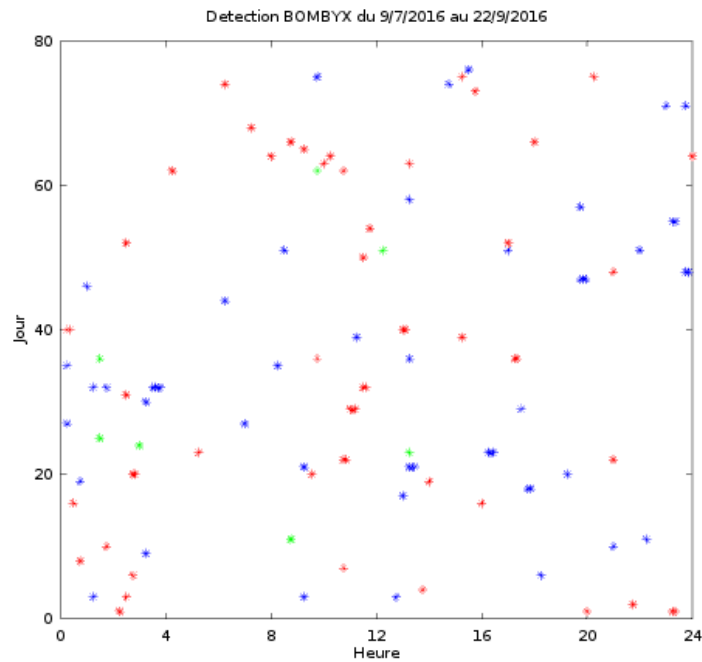


Figure 21: Rasterplot des données de BOMBYX du 09 juillet au 22 septembre 2016 (*Rouge*: Cachalot allant d'Est en Ouest, *Vert*: Cachalot suivant une courbe ISO TDOA, *Bleu*: Cachalot allant d'Ouest en Est)

La figure 21 représente les différentes trajectoires des cachalots sur 76 jours, en fonction des heures de la journée. Le nombre de cachalots effectuant le trajet Est/Ouest est égal au trajet Ouest/Est. Mais peu d'individus parcourent la zone du Nord au Sud ou inversement sur une ligne "isoTDOA" (vert). Une interprétation serait que les cachalots effectuent des allers/retour le long de la côte.

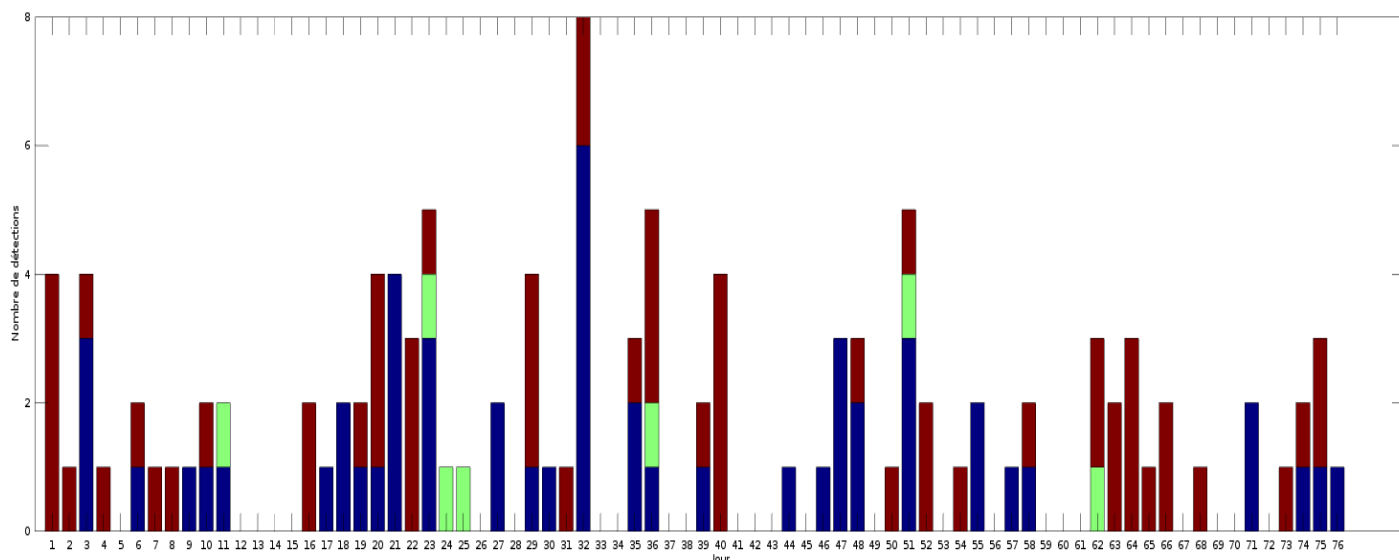


Figure 22: Histogramme du nombre et des déplacements des cachalots en 76 jours 09 juillet au 22 septembre 2016. (*Rouge*: Cachalot allant d'Est en Ouest, *Vert*: Cachalot suivant une courbe ISO TDOA, *Bleu*: Cachalot allant d'Ouest en Est)

La différence des cumuls de chaque direction indique que le nombre minimal de cachalot est de 20 individus, qui effectuaient des allers retours réguliers.

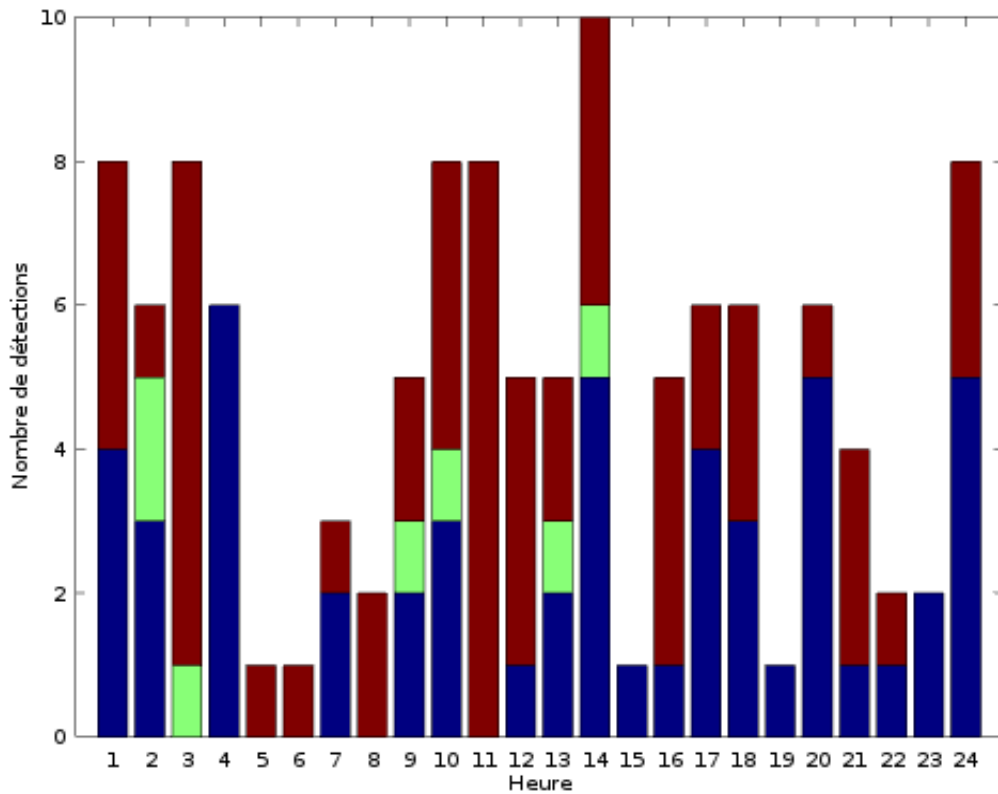


Figure 23: Histogramme du nombre et des déplacements des cachalots résumé en cycle de 24 heures de toutes les données du 9 juillet au 22 septembre 2016 (Rouge: Cachalot allant d'Est en Ouest, Vert: Cachalot suivant une courbe ISO TDOA, Bleu: Cachalot allant d'Ouest en Est)

La Fig. 23 montre une tendance entre 5:00 et 8:00 du matin, le nombre de détections est très faible, tandis qu'il augmente de 10:00 à 12:00, puis diminue. Les déplacements d'Ouest en Est (bleu) sont importants de 17:00 à 20:00 tandis qu'à l'inverse les déplacements d'Est en Ouest sont plutôt réalisés en fin de matinée.

Partie C : Allométrie

C1. Définition et mesure de taille

Le cachalot émet des clics de quelques millisecondes composés d'une séquence de pulses. L'intervalle de temps entre ces pulses (IPI) dépend entre autres, 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 (Antunes, 2013).

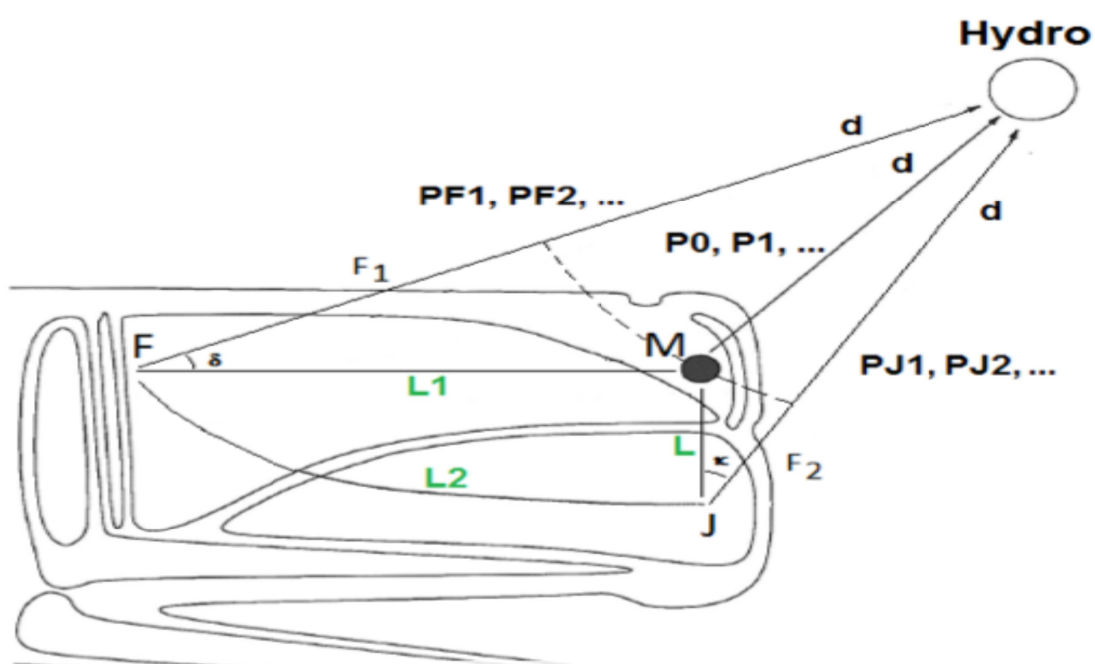


Figure 24 : Schéma de la tête du cachalot, M foyer initial (Museau de singe), P0 émission initiale, Pji émission du Junk, Pfi les faux pulses reçus surtout si l'animal est à un angle de 90°. La mesure nominale P0PJ1 est en relation directe avec la taille de la tête (Abeille, Glotin 2013 ; Antunes, 2011).

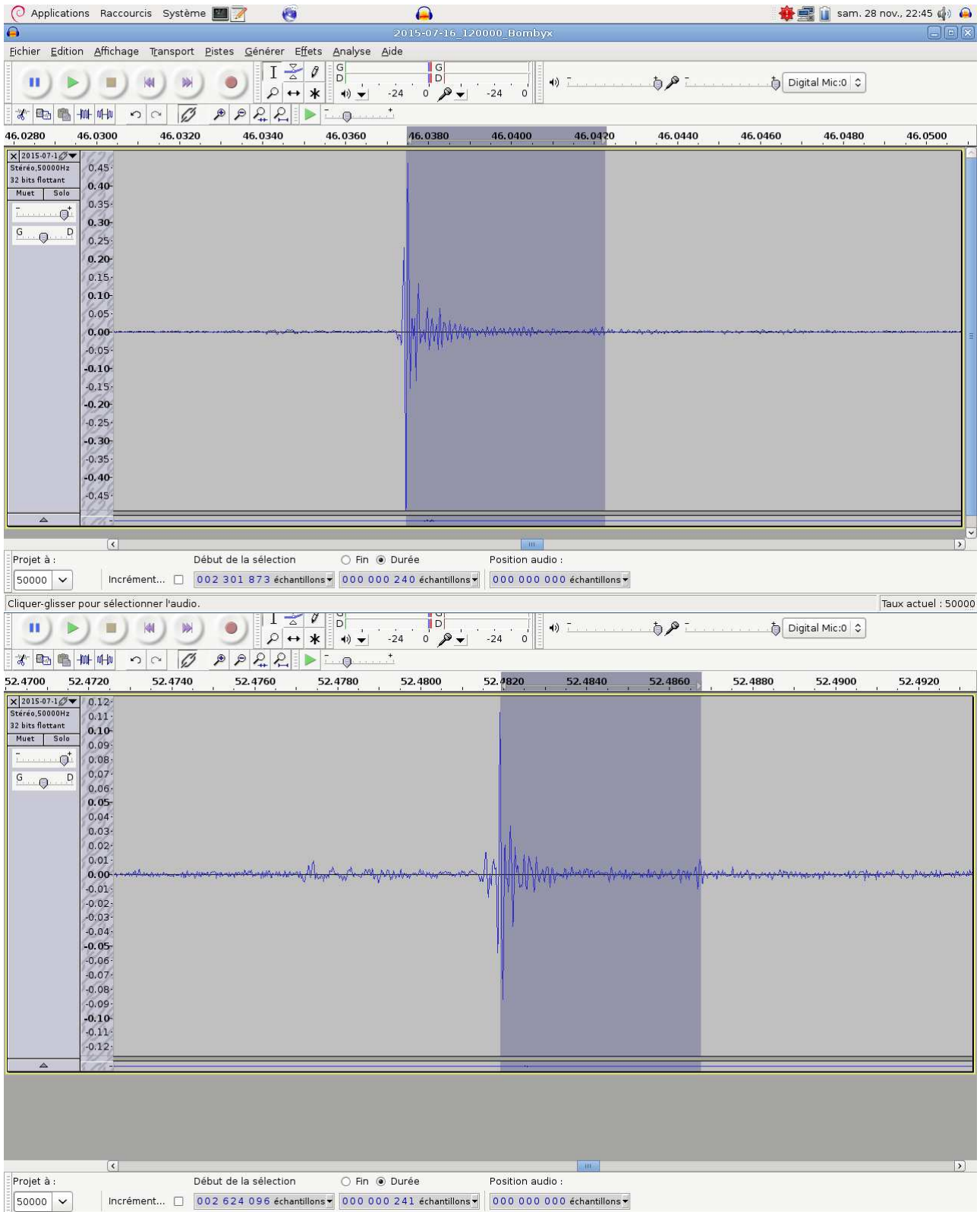


Figure 25 : Haut et bas : deux mesures de l'IPI nominal ($P1, P2$) du cachalot enregistré le 16 juillet 2015 vers midi, montrant un IPI de 240 ou 241 échantillons, soit 2.51 ms, soit un cachalot non adulte d'environ 8 m d'après les lois allométriques proposées sur des populations hors Méditerranée (Abeille et al., 2013).

Coûteuses en temps, les méthodes de mesure de l'IPI nominal sont faussées par l'orientation du cachalot par rapport à l'hydrophone et donc imprécises, et sont peu fiables pour discriminer les individus. Nous avons proposé un algorithme (BIVIP) plus rapide et robuste à l'orientation de l'animal et à des émissions concomitantes de plusieurs cachalots. Il devra être lancé sur toutes les détections de Bombyx 2015, 2016 et suivantes pour raffiner les résultats de ces premières expériences sur les To de données collectées.

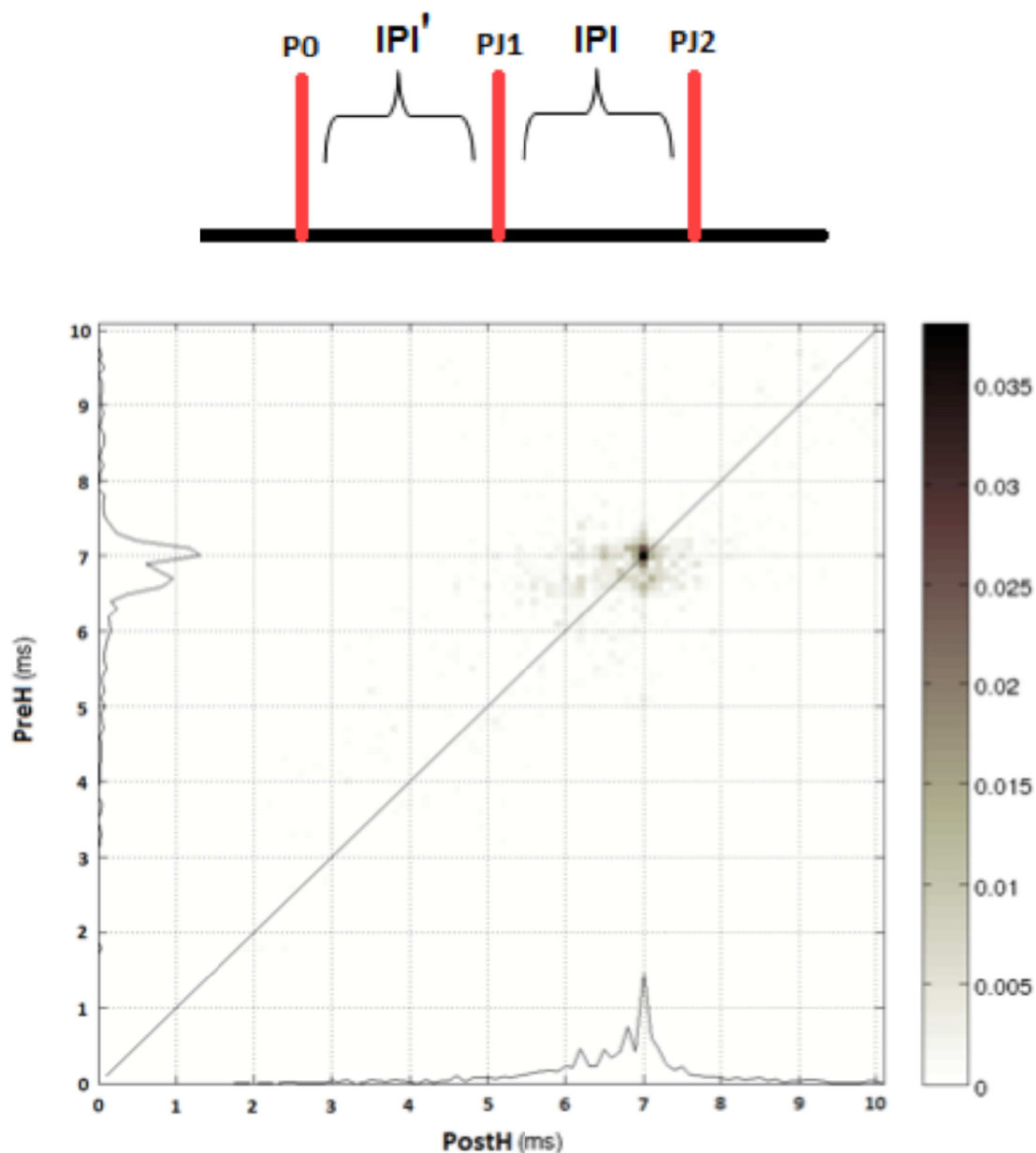


Figure 26 : (Haut) : Schéma d'un clic on axis sans PF. (Bas) : Une mesure de P0PF1 (PreH) et PF1PF2 (PostH) par BIVIP, pour un clic on axis : les délais sont identiques (noyau de densité sur la diagonale). Voir détails dans Abeille et al., 2015.

En revanche, un clic qui n'est pas observé on axis est susceptible de comporter un pulse « faux », PF1 qui perturbe la mesure de PJ1PJ2 (id est l'IPI nominal) comme représenté dans les deux schémas ci-dessous.

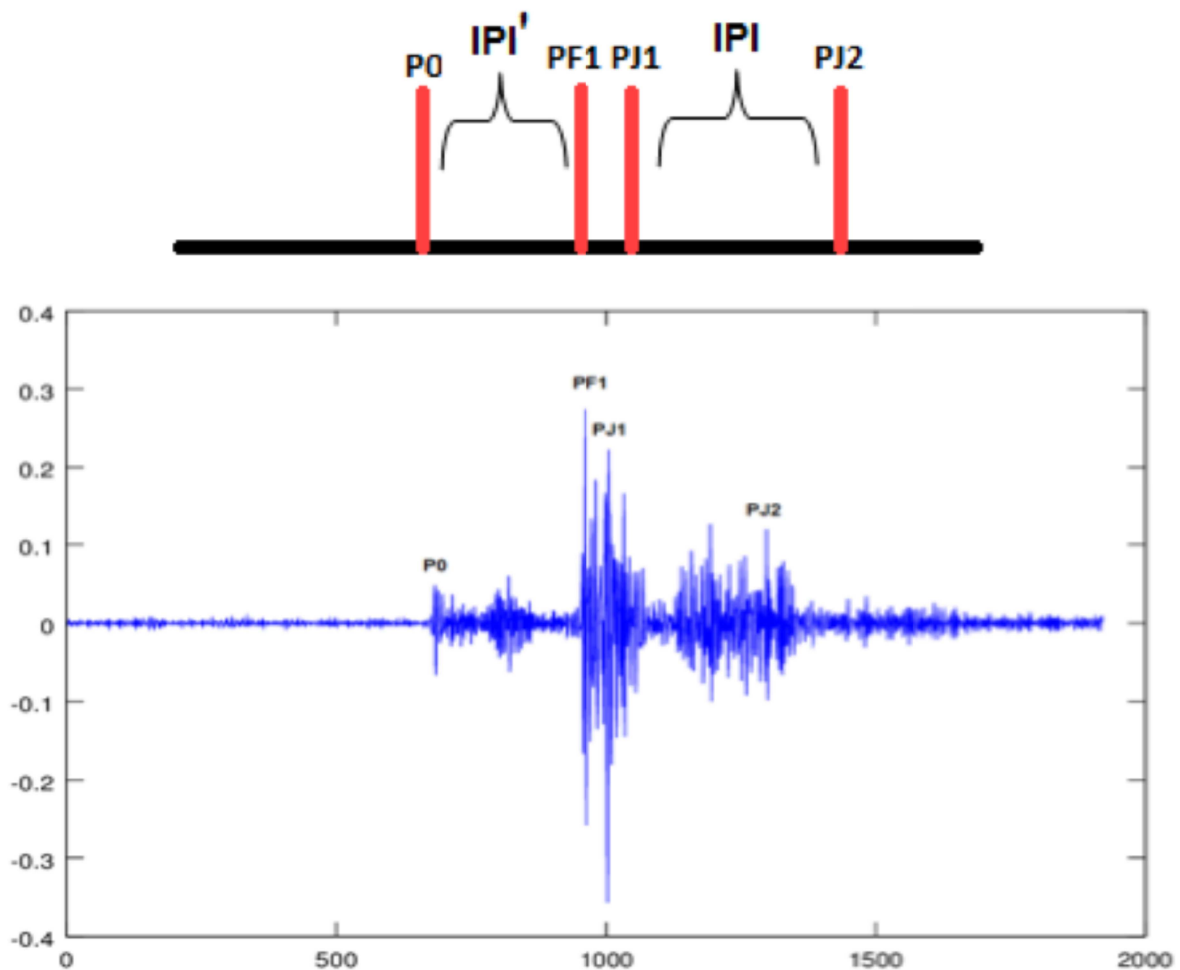


Figure 27 : (Haut) le schéma d'un clic off axis et (Bas) une mesure réelle sur le corpus Zodiac PNPC.

BIVIP est performant, mais requiert environ 300 clics pour une mesure précise. Nous avons détecté dans VAMOS des clics à plus de 10 km, et sur des intervalles courts de quelques minutes, les 300 clics ne sont pas toujours atteints. Nous avons donc tiré profit de la mesure de piste pour extraire des IPI nominaux. En effet, dans notre protocole nous savons quand l'animal est on axis (début de piste), quand il est à 90° (délai nul) et quand il est off axis (fin de piste). Nous avons donc extrait les IPI par simple autocorrélation moyenne des clics on axis, méthode que nous nommons IPI stéréo. C'est une nouvelle méthode temps-réel et robuste. Elle ne peut s'appliquer que si l'orientation de l'animal est connue, et c'est donc un grand avantage de Bombyx 2015, 2016 et suivants.

Le résultat en densité IPI des animaux détectés sur 2 mois d'été en 2015 et 3 mois d'été en 2016 est donné ci dessous.

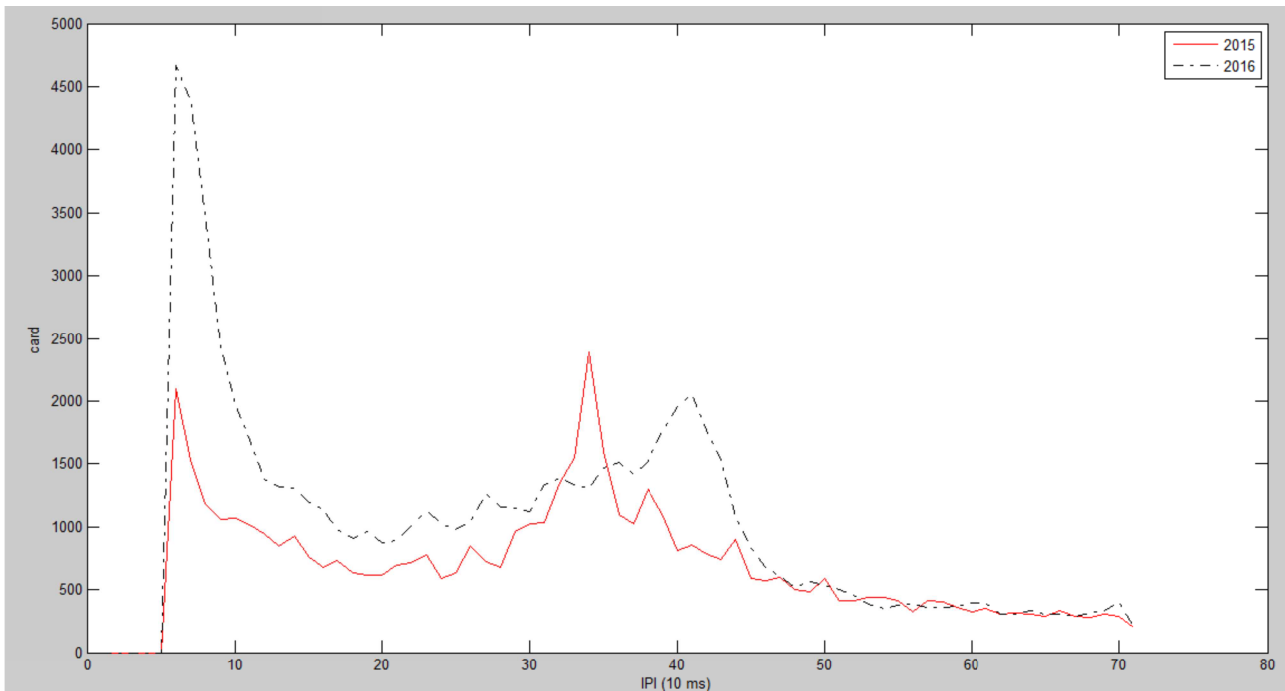


Figure 28: densité des IPI mesurés par Bombyx 2015 vs 2016, en 0.1 ms. On observe un décalage de l'IPI de 1 ms entre 2015 et 2016. Nous avons réinspecté les mesures. Il y a beaucoup plus de détections en 2015 qu'en 2016 pour la même durée de session. Il s'avère que 2015 est saturé de faux positifs et que la distribution de 2015 (rouge) reflète les vibrations de la structure et des attaches verticales des hydrophones (premier protocole invalide pour l'estimation des IPI). Seule une inspection manuelle ou des algorithmes plus complexes pourraient correctement traiter les mesures IPI de 2015.

Les mesures IPI en 2015 sont plus complexes car les hydrophones étaient fixés différemment et le fort courant a généré des vibrations d'une période de l'ordre de la milliseconde. Il en résulte un artefact et un décalage de la distribution.

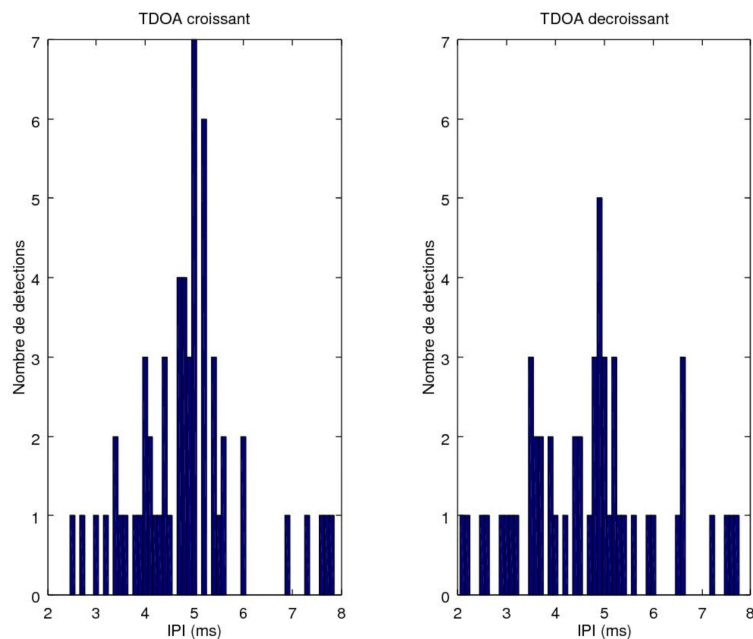


Figure 29 : Mesure des IPI en fonction de la trajectoire des cachalots. Ces histogrammes sont construits à partir des mesures IPI dont certaines sont données en annexe, montrant un ou deux animaux clairement mesurés.

La figure 29 donne la distribution des IPI pour les TDOA croissants versus décroissants, allant donc dans un sens et son contraire. Les deux distributions sont assez similaires. Donc il est probable que ces interpulses appartiennent aux mêmes individus.

C2. Relation allométrique

Les relations allométriques permettent d'estimer la taille de chaque cachalot détecté, même en cas d'enregistrements simultanés de plusieurs individus. BIVIP est validé sur le corpus Pelagos DECAV 2009-2012. Les relations étaient jusqu'en 2013 uniquement basées sur des abaques Atlantiques ou Pacifiques. Pierantonio et al. publient en 2016 les relations allométriques basées sur des abaques de Méditerranée (Fig. 27, 28). Nous appliquons donc cette relation sur les IPI mesurés dans la section précédente.

Le polynôme proposé est :

$$\text{taille (m)} = 1.4172 \text{ (m/ms)} * \text{IPI (ms)} + 4.6320 \text{ (m)}$$

Il diffère de la loi de Growcott 2011, par exemple pour ces individus ci-dessous, gauche Growcott, droite la nouvelle relation. Il est valable dès un IPI de 4.5 ms.

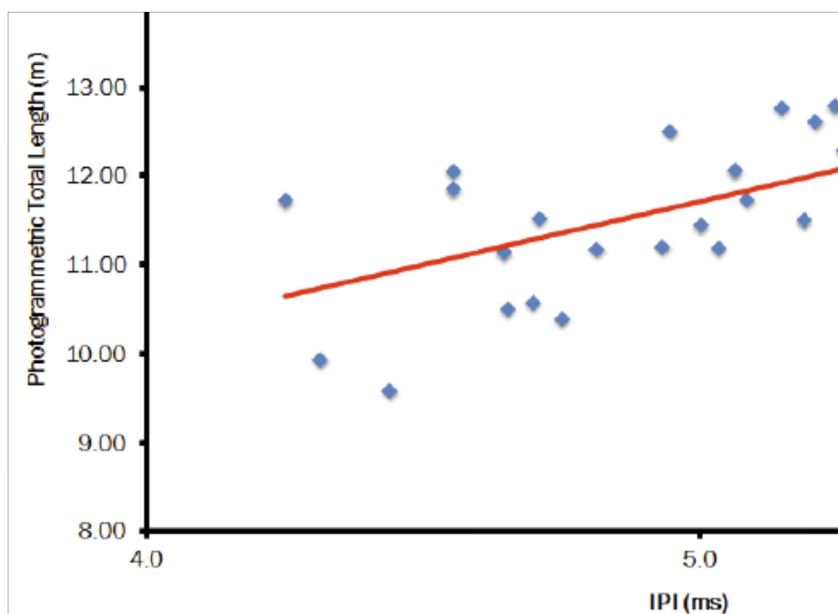


Figure 30 : relation $f(IPI) = \text{taille de Pm}$ d'après (Pierantonio et al., 2016).

Individus	Growcott (2011)	Pierantonio (2016)
NOTCH	11,44	11,07
OLIVIER	11,6	11,25
PAT	12,81	12,6
RUS	11,16	10,74

Table 31: Quatre tailles en mètres (estimées) de Growcott (2011) (gauche) versus d'après (Pierantonio et al. 2016) (droite) pour quatre individus.

L'application de cette loi sur notre corpus IPI montre un centroïde de taille à 11.53 m.

C3. Mesures photographiques

Plusieurs photographies ont été prises par drone le 11 Septembre 2016 depuis La Croix du Sud au Sud du Cap Sicié. Les films de plusieurs minutes montrent une femelle allaitant son jeune et probablement une autre femelle adulte. Il n'a pas été possible de trouver sur Bombyx les IPI de ces individus, trop éloignés. D'autres sorties ont été faites (environ 8 sur Croix du Sud, et quelques unes avec des contacts par le PNPC). Mais nous n'avons pas eu avant fin octobre d'autres contacts visuels photographiés de travers et joints à des mesures acoustiques pour vérifier les lois allométriques.

Nous avons néanmoins mis en place un protocole : il s'avère important pour les photographies prises depuis un bateau, de relever la distance de prise de vue par télémètre laser que nous avons testé et validé sur cachalot en sortie sur La Croix du Sud. Un lot de photographies sur rorqual a été pris suivant ce protocole, mais nous n'avons pas pu exécuter avec présence de cachalot dans le temps imparti.

Néanmoins, nous avons montré la mise en place effective de séparation de pistes acoustiques précises et de localisation de secteur de présence des *Pm*. Nous estimons les IPI des animaux rencontrés par tout observateur, même si non équipé de système acoustique. Si les photographies du protocole bioacoustique du PNPC ou autres sont calibrées, nous pourrions alors consolider les relations allométriques de la section précédente.

Conclusion

Vers une alerte en ligne de passage de cachalot et interface de visualisation

Les calculs de suivis que nous avons mis en place dans VAMOS sont temps-réels. Nous avons réalisé le suivi des pistes sur 5 mois en environ deux semaines de calculs, nous sommes donc 10 fois plus rapides que le temps-réel.

Nous proposons donc dans la suite de rajouter deux hydrophones sur Bombyx afin de rajouter des observations sur la distance de l'animal, sans risquer la surcharge de calcul. JASON permet de réaliser ce challenge, car elle est faible consommation et 4 voies. Le tube et les connectiques ont été réalisés pour cet objectif.

Etant donné les très bons résultats en suivi de piste et extraction d'IPI dans VAMOS, nous pensons qu'il sera intéressant de travailler une solution de transmission d'alerte depuis Bombyx lors de la présence de cachalot. Pour cela nous suggérons :

a) soit de calculer les détections et localisations en mode embarqué dans Bombyx avec la carte JASON sur son PIC que nous maîtrisons. Dès lors une alerte serait lancée par une petite antenne radio souple en surface de la bouée Bombyx (faible consommation, relais sur PC).

b) soit de relayer en temps-réel le signal de Bombyx en plus de celui de MEUST vers nos calculateurs dans le but de doter notre système de l'interface web qui enverra, à qui de droit désigné par PNPC (opérateurs NGV, navires marchands) avec un login dédié, les suivis calculés sur notre serveur, au travers d'une interface graphique simple et robuste de type HTML5, pour notamment alimenter REPCET.

La face Ouest de Bagaud est bien placée pour une surveillance Sud Port-Cros. Nous proposons de compléter Bombyx par deux hydrophones câblés et relayés vers le continent par WIFI. Nous avons fait le test entre Eminence et Rayol par une petite antenne wifi, sur 18 km à 2 Mo/s en wifi civil. Le test fut concluant en octobre 2015 (voir attestation du directeur du jardin du Rayol qui accepte d'accueillir l'antenne Wifi). Nous proposons de compléter avec une transmission Wifi d'Eminence à Bagaud si une autorisation est délivrée. Le matériel est déjà acquis sur crédits CNRS et IUF Glotin.



Figure 32 : (Gauche) Photo de l'antenne Wifi testée le 20 octobre 2015 pour VAMOS, sur le toit du fort de l'Eminence PC, montrant son faible impact visuel. (Droite) Schématisation de la transmission : environ 20 km Wifi de PC à Rayol validée en oct. 2015. Elle pourrait assurer la transmission Temps Réel entre Bombyx 2017 (si munie d'un émetteur), ou une installation hydrophone filaire 300 m depuis Port-Cros ou Bagaud, et UTLN / CROSS Med.

Nous résumons ci-dessous l'architecture complète de VAMOS initialement prévue, réalisée en partie :

a) Le système VAMOS, software sur le mésocalcateur de l'UTLN, est connecté par IP sur ANTARES depuis l'institut PACHA, mais ANTARES a subi une avarie et a été stoppé assez tôt en 2016. Il détecte des sources bioacoustiques par ses colonnes d'hydrophones A1... An. Nos procédés donnent une estimation de la position de l'animal (en L). Ceci est validé sur ANTARES en 2015 avant fermeture ANTARES en 2016, et sera testé sur MEUST dès Mai 2017.

b) Cette information est lisible par 3G depuis une embarcation, sortie avec le PNPC ou autre, qui largue un hydrophone pour affiner la position de l'animal et estimer sa zone de respiration (M).

c) Si M est assez précis, le quadriptère (par exemple un DJ Phantom 3) est envoyé depuis l'embarcation vers M au moment où est estimée la remontée de l'animal. La non livraison du drone en fin 2015 a été résolue par une nouvelle commande, le drone est à disposition pour le PNPC, modulo l'autorisation préfectorale indispensable pour voler dans le secteur.

d) Une caméra embarquée permet de visualiser en temps réel la surface, et donc de prendre plusieurs vues de l'animal. D'une part la position GPS de l'animal est alors précise, et la hauteur du quadriptère et son angle de vue étant connus, les vues défilantes de l'animal permettent d'en mesurer sa longueur. Un vol drone du 11 sept. 2016 nous a permis de valider ce protocole.

e) La mesure de position permet d'affiner et de corriger les modèles de localisation. La durée d'une piste est comprise entre 3h et 8h30. Les individus ne semblent pas tous emprunter le même chemin (on note des pentes en 0 variables donc les distances à Bombyx sont variables).

* Les trajectoires sont rectilignes, parallèles au talus. Des cas rares montrent le passage de l'animal entre Porquerolles et Port-Cros.

* Nous observons des déplacements de cachalots sans préférence significative de sens ni de date.

* Les individus passent devant Bombyx à des horaires différents, même si une légère tendance en milieu de journée semble se dégager (à vérifier en cumulant Bombyx 2017 dans un projet suite à VAMOS).

* On montre une tendance pour une accélération des nages de cachalot dans le sens du courant Ligure, à confirmer sur Bombyx 2017.

* L'analyse croisée des directions de nage, IPI, distance seront à compléter avec Bombyx 2017.

f) La mesure de taille permet de construire (pour le cachalot et peut-être pour d'autres espèces) la loi allométrique acoustique / longueur de l'animal. Cela revêt un caractère particulier pour les cachalots de Méditerranée, car cette loi n'est que récemment proposée par Piereantonio 2016. Les données actuelles sont issues de Ligure, et seront complétées par les observations VAMOS 2015 et 2016 et suivantes.

g) Bombyx permettra par ses mesures de vérifier les modèles depuis des observations sub-surfaces fixes. Les positions relatives de MEUST et Bombyx permettront, au vu des données GPS obtenues par quadriptère, de définir le degré de précision d'estimation de la position de la source dans une grande zone Sud Porquerolles pour un rayon de 4 km environ.

Initialement supposée de 4 km (Doh 2014), il s'avère que 15 km est la portée probable des détections, jusqu'à 20 km au maximum. Ce sont des valeurs également à lier avec les distances estimées inter groupes cachalots qui se déplacent souvent par 2 ou 3 à moins de 20 km les uns des autres en se référant au temps qui sépare des individus allant dans le même sens (2h en moyenne sur les pistes de délai de Bombyx, et pour une vitesse de nage de 10 km/h environ d'après Glotin et al. 2008).

h) Nous avons évoqué l'intérêt de relayer les données en temps réel pour un programme anti-collision. La mise en ligne de Bombyx est délicate, la proposition de placer 2 hydrophones sur Bagaud est une bonne perspective avec transmission Wifi sur le continent.

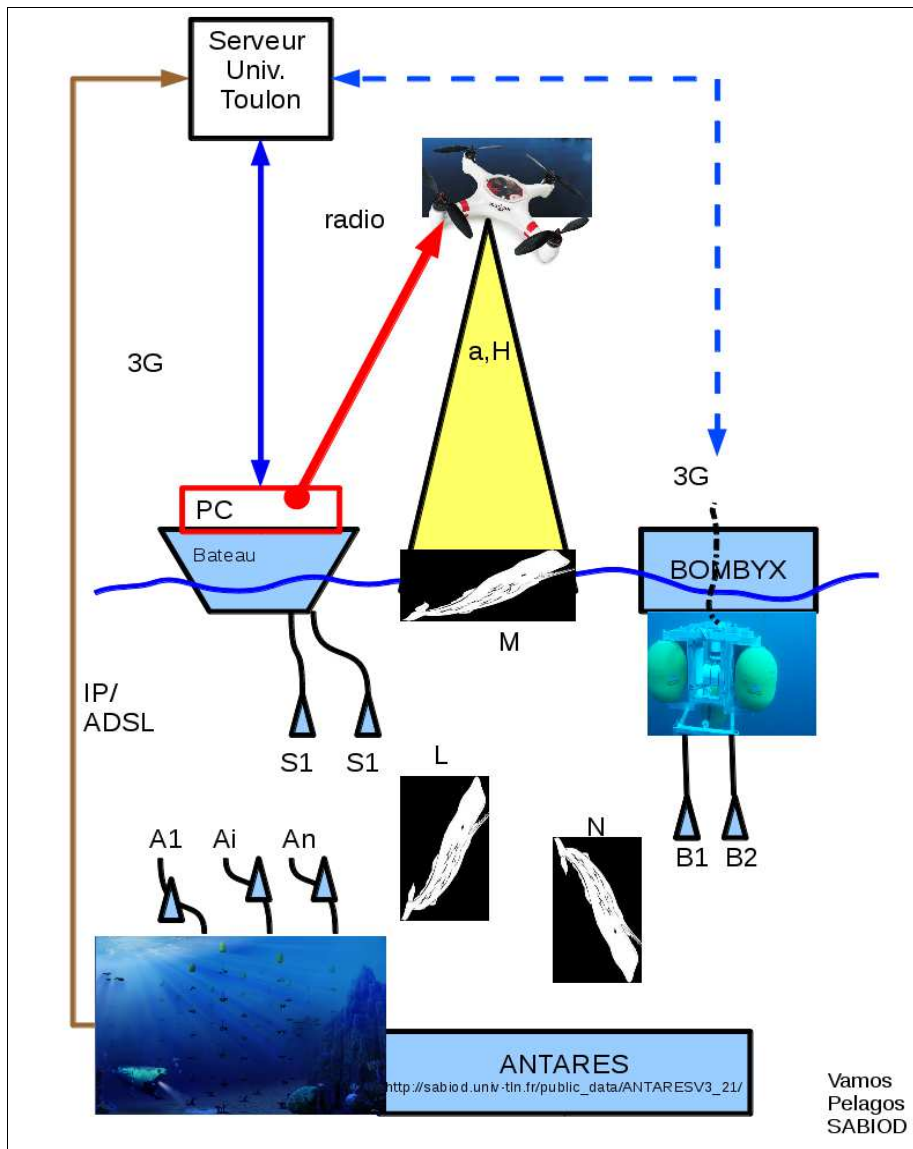


Figure 33 : Architecture globale de VAMOS. Nous détectons des sources bioacoustiques par les colonnes d'hydrophones ANTARES A1... An. Nous estimons la position de l'animal (en L). Cette information est lisible par 3G depuis une embarcation, d'où on largue un ou deux hydrophones pour affiner la position de l'animal et estimer sa zone de respiration (M). Si M est précis, un quadriptère est envoyé depuis l'embarcation vers M (à 100 m de l'animal). Une caméra embarquée visualise en temps-réel la surface. D'une part la position GPS de l'animal est précisée, et la hauteur (H) du quadriptère et son angle de vue (a) étant connus, les vues défilantes de l'animal permettent d'estimer sa longueur. Les modèles de localisation, voire les lois allométriques entre IPI et longueur de l'animal peuvent être affinées. Bombyx est hors ligne pour le moment, le 3G ou VHF vers Bagaud étant envisagé après la pose d'un pont WIFI entre Bagaud et Fort Eminence, et entre ce dernier et le Jardin du Rayol ou la maison Foncin puis le web vers le serveur UTLN.

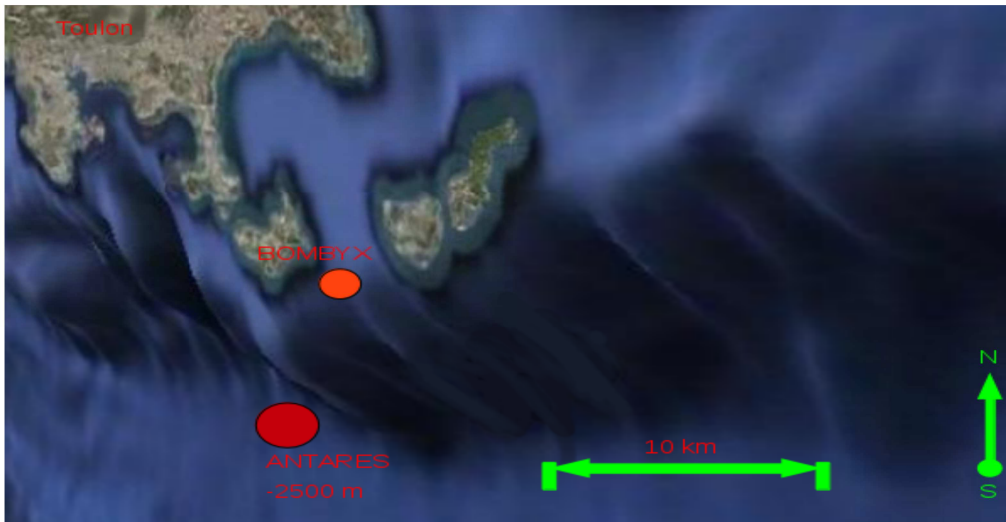
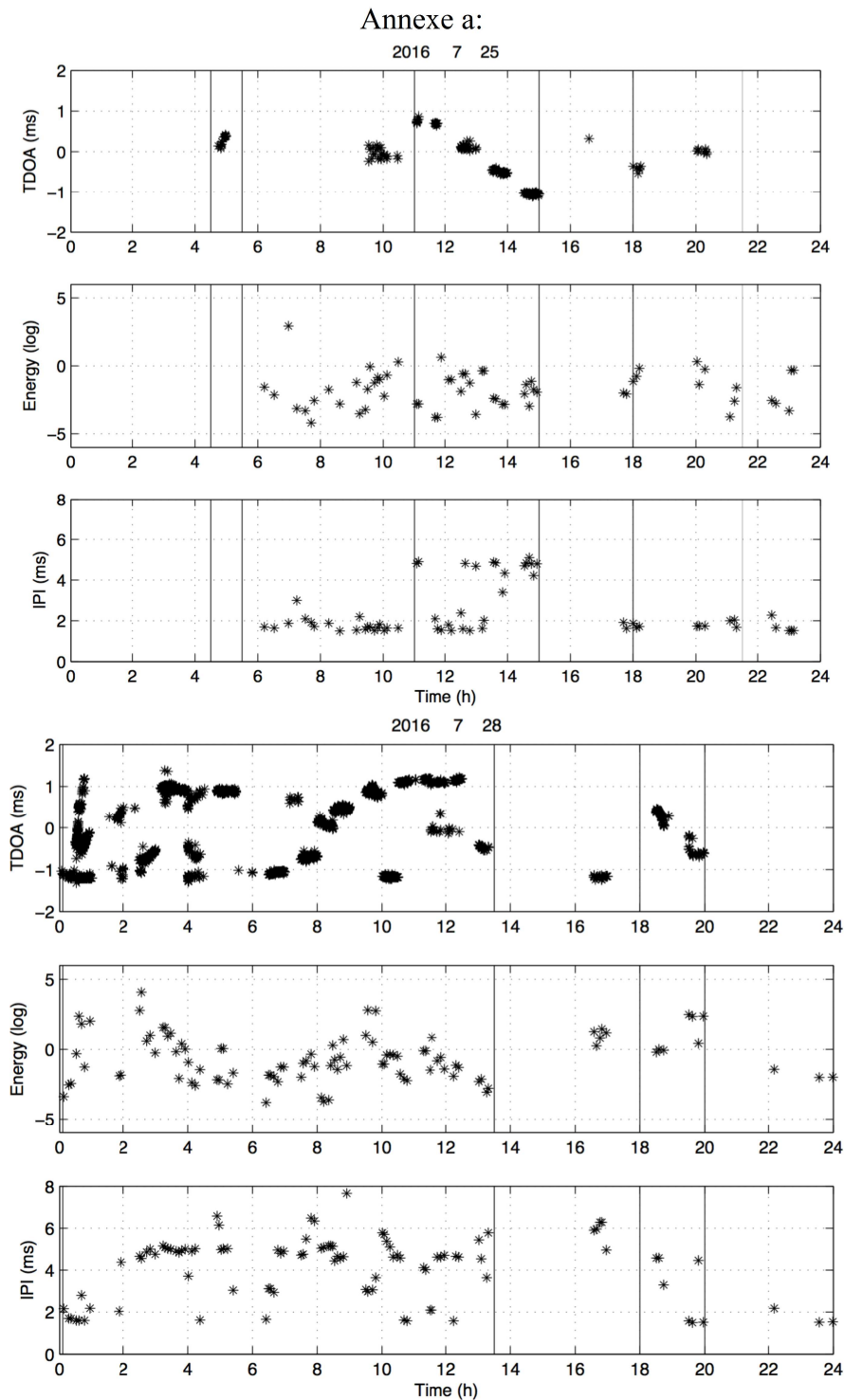


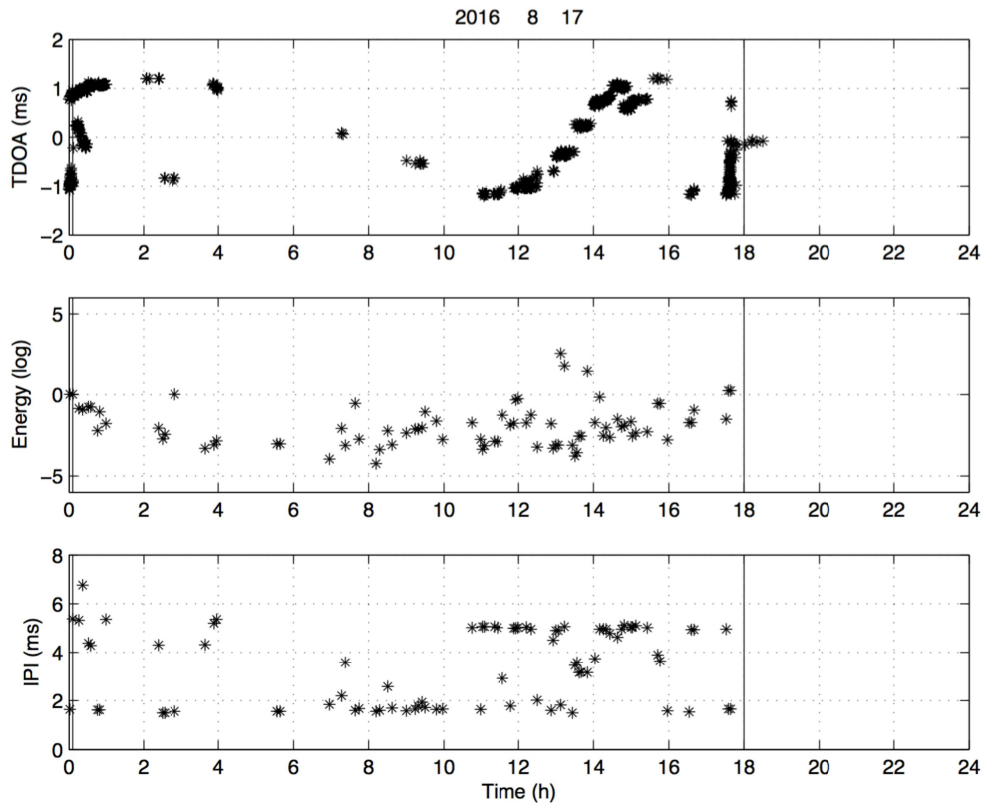
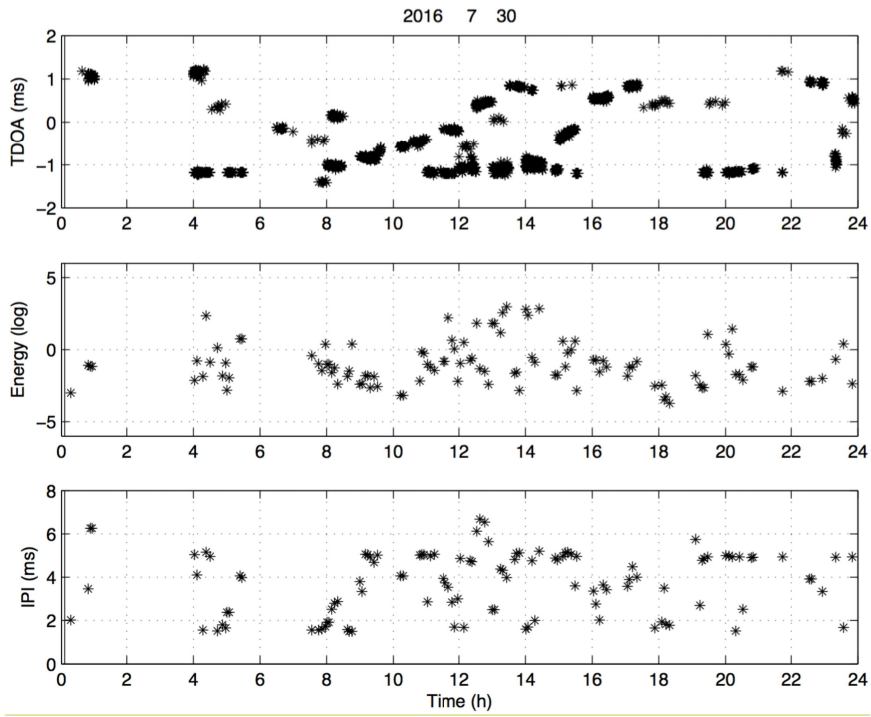
Figure 34 : Les positions des deux observatoires bioacoustiques Bombyx (UTLN) et ANTARES / MEUST à l'Ouest d'ANTARES (IN2P3, collab. LSIS UTLN FEDER) dont DYNI LSIS (PI Glotin) pilote les lignes d'hydrophones pour les projets bioacoustiques, avec connection temps réel en fibre optique vers serveurs UTLN DYNI. Ces installations sont complémentaires, formant une base longue, permettant à terme de bien caractériser les déplacements / positions des cétacés par leur émissions acoustiques.

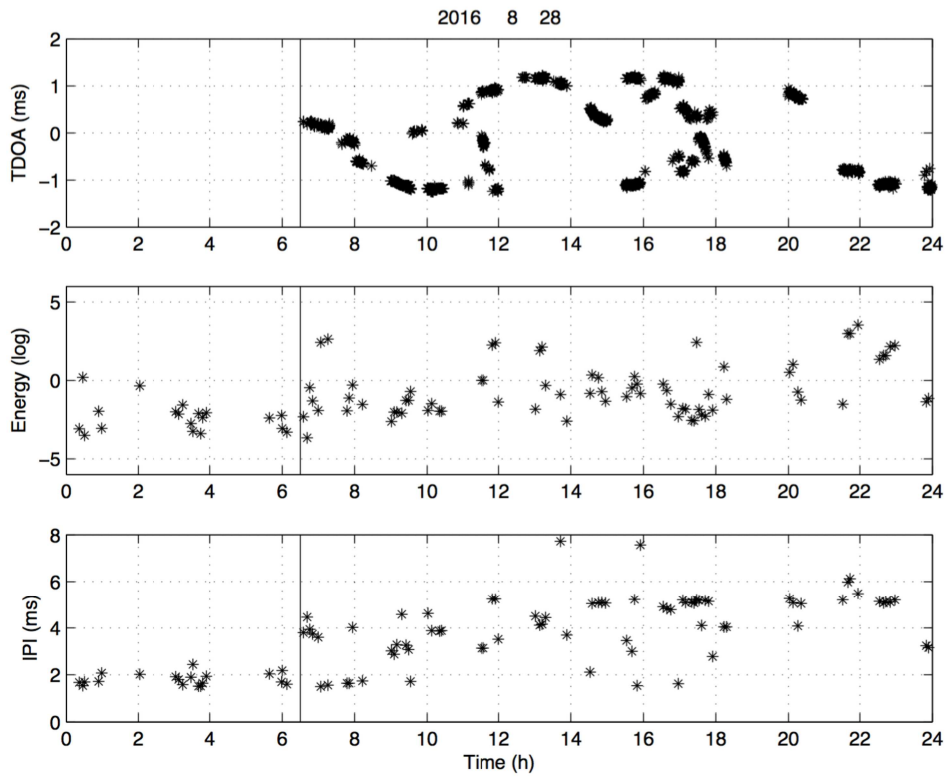
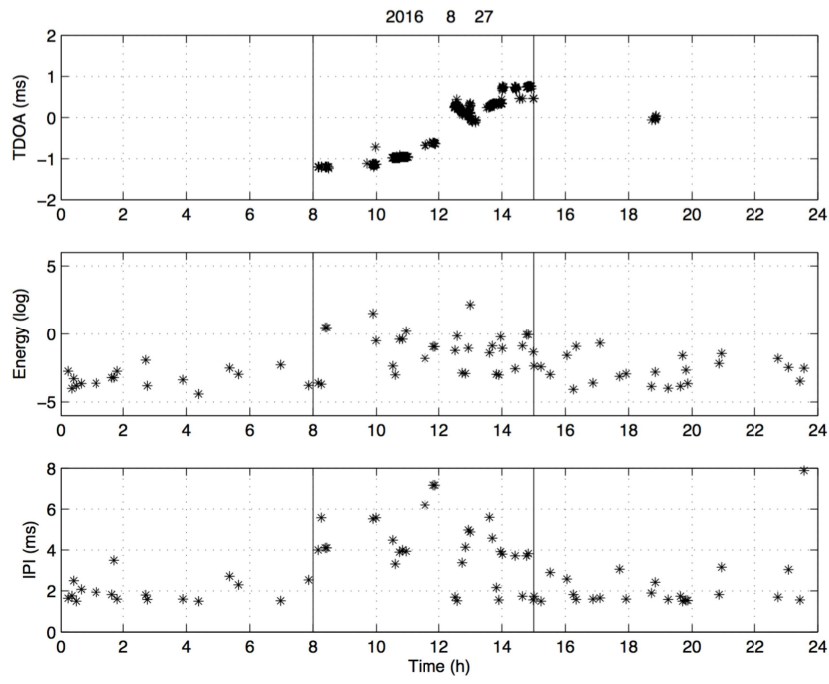
ANNEXES

L'annexe A donne pour différentes dates la représentation des TDOA, et également les énergies (\log_{10} de la somme des échantillons au carré) et les IPI en ms.

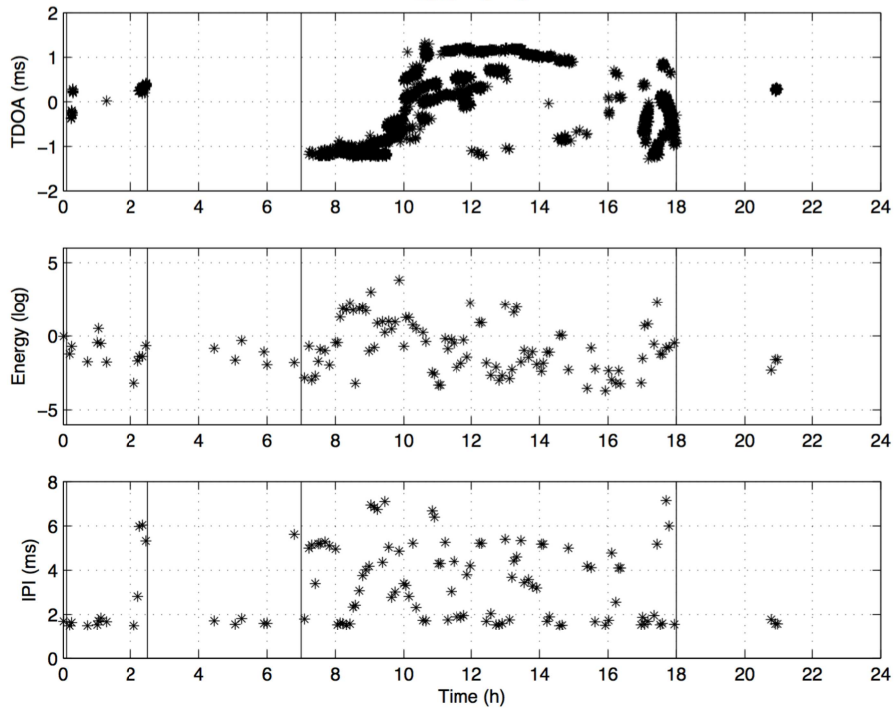
L'annexe B donne la mesure IPI pour plusieurs dates, montrant souvent 2 pics donc deux animaux présents.



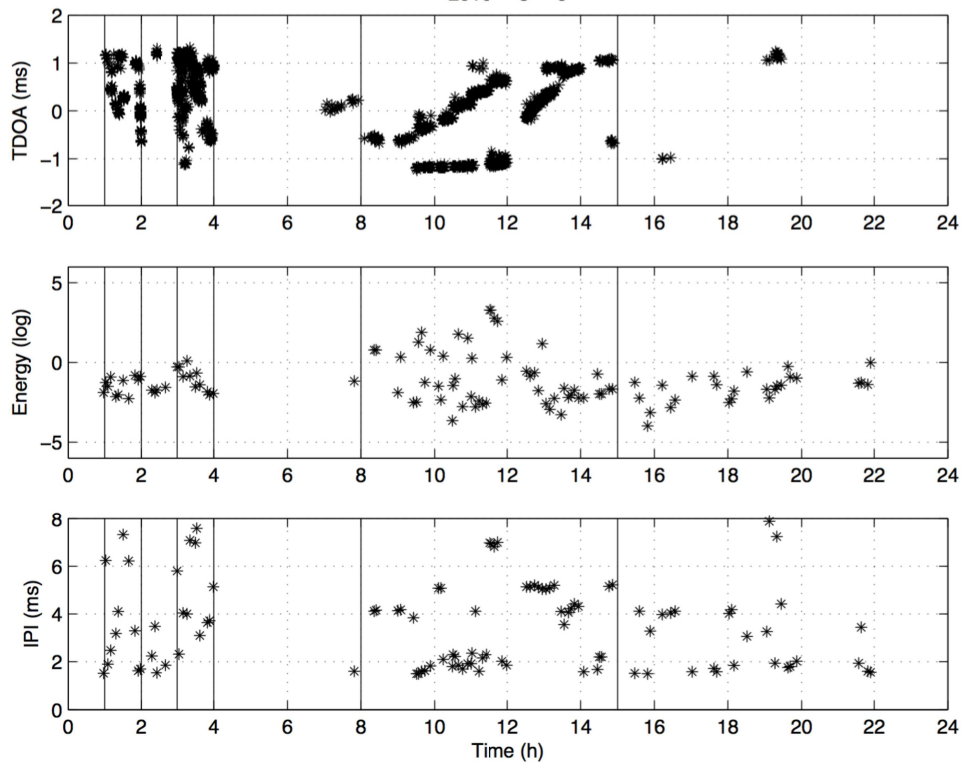


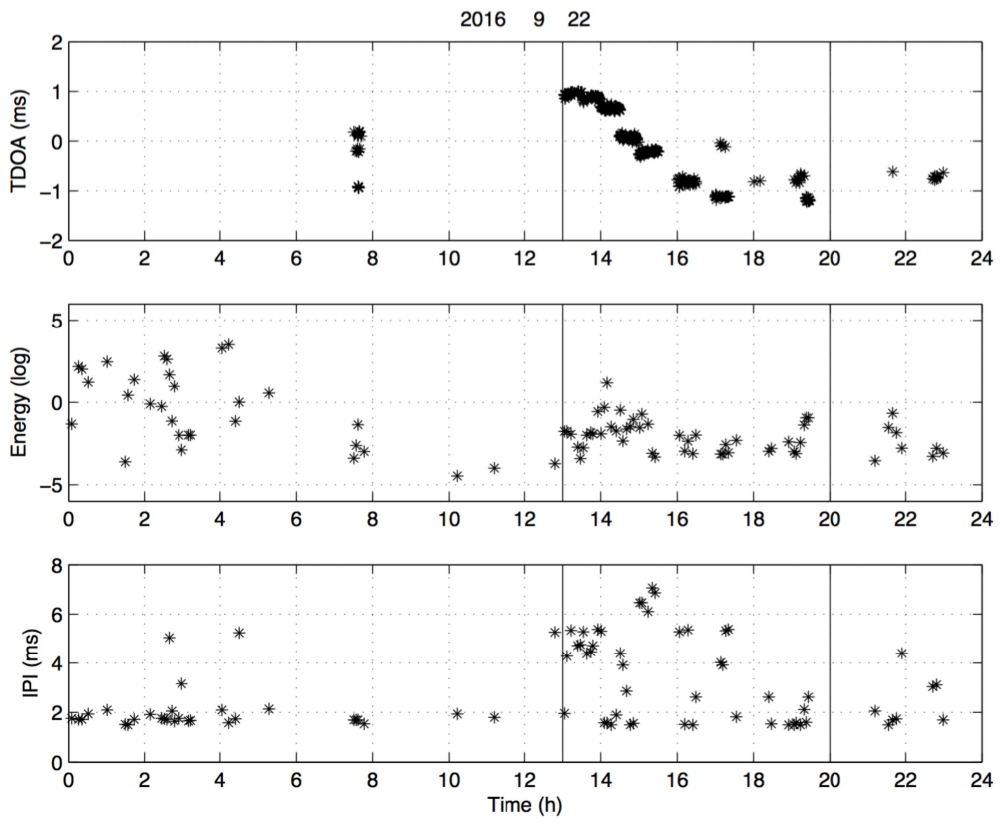


2016 8 6

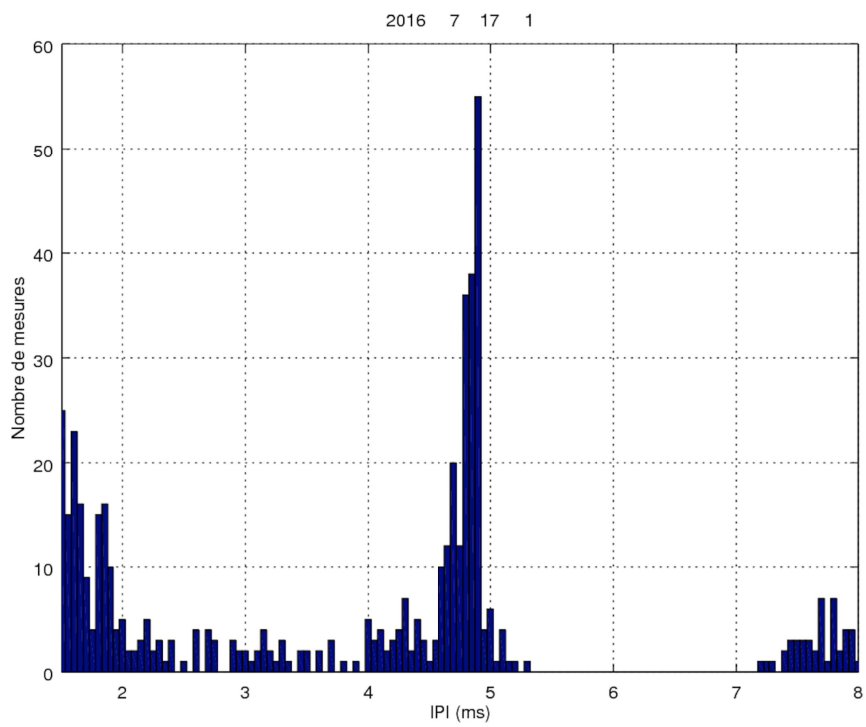
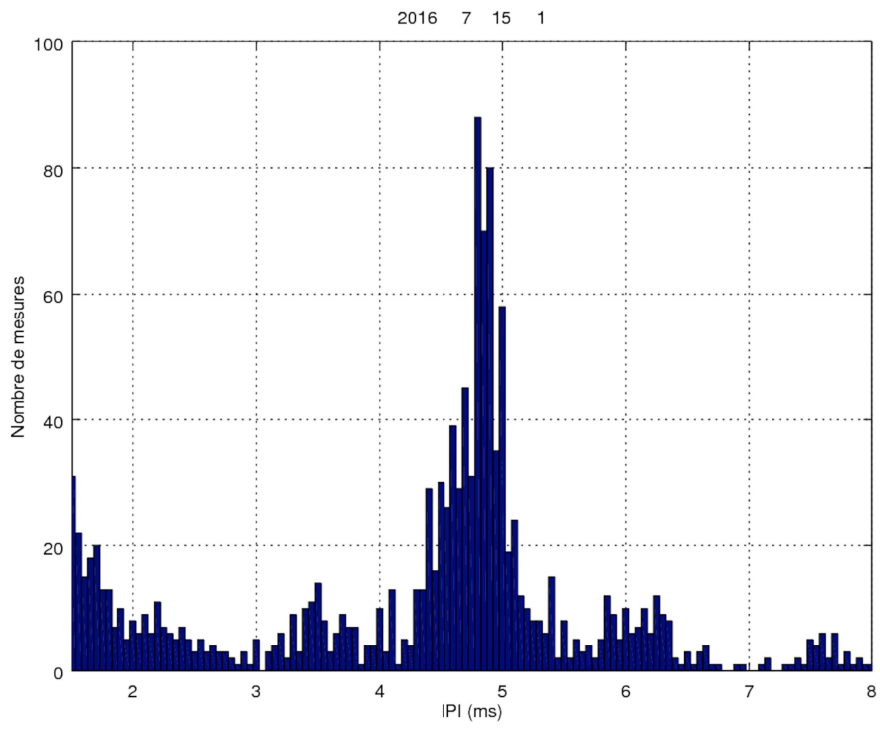


2016 8 9

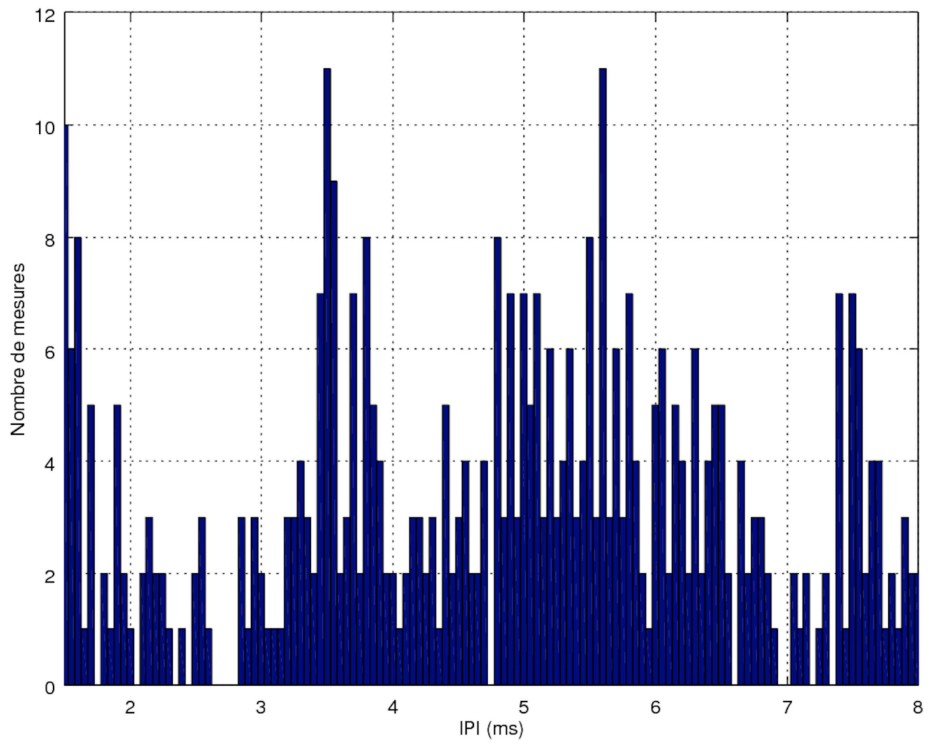




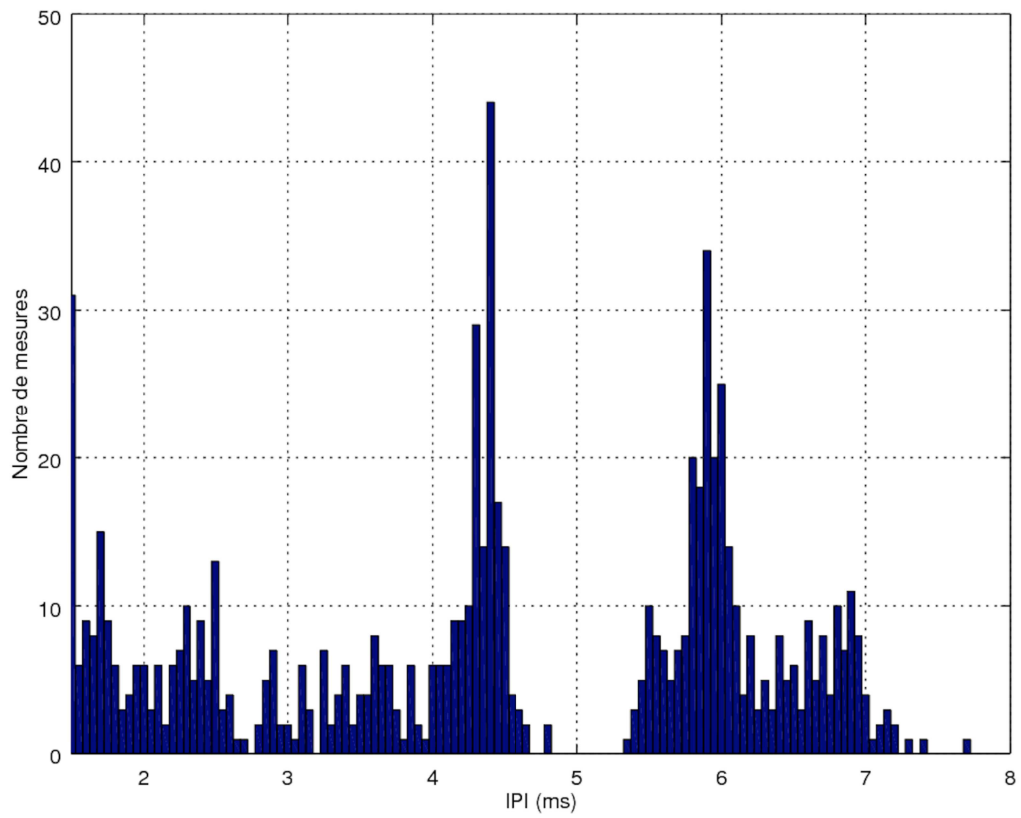
Annexe B:

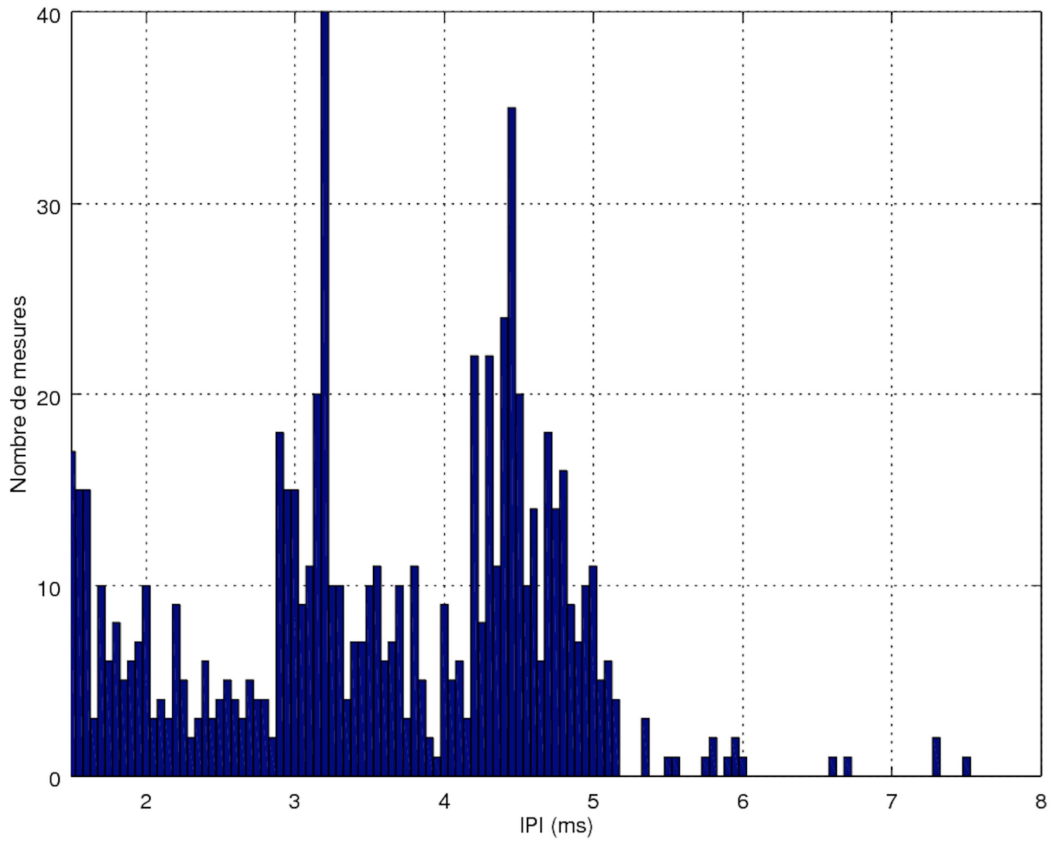


2016 7 19 1



2016 7 24 1





REFERENCES

Revues, thèses et publications avec comité de sélection

Abeille. R, 'Analyse automatique temps-réel des émissions sonores des cétacés à des fins d'identification et de suivi des populations', dir. H. Glotin, thèse UTLN, déc. 2013

Abeille. R, Giraudet. P, Glotin. H, 'Precise Inter-Pulse-Interval estimation in the biosonar of *Physeter Catodon* for population survey', IEEE OCOSS, 2013

Abeille. R, Doh. Y, Giraudet. P, Glotin . H, Prevot . J.M, Rabouy, 'Estimation robuste par acoustique passive de l'Intervalle Inter Pulse des clics de *Physeter macrocephalus*', Sci. Rep. PNPC, Vol 28:23-35 (2014)

Adam. O, Glotin . H, 'Passive acoustic storey of the ANTARES neutrino detector for real-time cetaceans detection, localization & behavior studies', PASSIVE IEEE, 6 pages, 2008

Benard. F, Glotin . H, Castellote. M, Laran. S, Lammers. M, 'Passive acoustic monitoring in the Ligurian Sea', 4th Int'l Workshop on Detection, Classification & Localization of Marine Mammals using Passive Acoustics (DCLDE), 2009

Benard. F, Glotin . H, Paris. S, '*Physeter catodon* clicks train rebinding using HMM', Navy Research ONR & CIBRA, 4th DCLDE, 2009

Benard. F, Glotin . H, 'Sperm whales records indexation using passive acoustics localization', IEEE Content Based Multimedia Indexing, 6p, ISBN 978-0-7695-3662-0, 2009

Benard. F, Glotin. H, Giraudet. P, 'Sperm whale localization with the astrophysic NEMO ONDE short-baseline platform' in Int.. Jour. Applied Acoustics, nov 2010

Benard. F, Glotin. H, 'Automatic Indexing for Content Analysis of Whale Recordings & XML Representation' EURASIP Journ., Sp. Issue, Advances in Signal Processing for Maritime Applications, <http://www.hindawi.com/journals/asp/2010/695017.html>, 2010

Caudal. F, Glotin . H, 'Stochastic Matched Filter Outperforms Teager-Kaiser-Mallat for Tracking a Plurality of sperm whales', PASSIVE IEEE online, 9 pages, 2008

Caudal. F, Glotin . H, 'High Level Automatic Structuration of Ocean Passive Data : from click sequence modulations to whale behavior', PASSIVE IEEE, 7p, 2008

Caudal. F, Glotin . H, 'Accuracy analyses of passive tracking of several Clicking Sperm Whales : A case of complex sources binding', Int. Conf on Signal Processing & Multimedia Applications, 8p, ISBN 978-989-8111-62-3, 2008

Caudal. F, Glotin . H, 'Multiple RT 3D tracking of simultaneous clicking whales using hydrophone array & linear sound speed profile', ICASSP IEEE, 4p, 2008

Caudal-Bénard. F et Glotin. H , 'Trajectographie de cétacés par acoustique passive', rapport recherche sur les travaux de thèse 2008-2010

Doh. Y, Glotin. H, 'Model of *Physeter Macrocephalus* Pulsed Sound Emission by Green Function', 5th Int'l Workshop on Detection, Classification, Localization & Density Estimation of Marine Mammals using Passive Acoustics (DCLDE), Portland, USA, ONR Navy & Acoustical Society of America (ASA), 2011

Doh. Y, Abeille. R, Glotin. H, 'Can we estimate the Radial Velocity of a *Physeter Macrocephalus* from Doppler Effect', 5th Int'l Workshop DCLDE, 2011

Doh. Y, Razik, J , Paris. S, Adam . O, Glotin. H, 'Décomposition parcimonieuse des chants de cétacés pour leur suivi', in Revue Traitement du Signal, N° spécial Acoustique Sous-Marine, Ed J. Mars, Lavoisier, nov 2013

Doh . Y, thèse UTLN, dir. H. Glotin, co-dir Adam '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', soutenance 17 Déc 2014

Giraudet. P, Glotin . H, 'Echo-Robust and Real-Time 3D Tracking of Marine-Mammals using their Transient Calls recorded by Hydrophones Array', IEEE Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), V4, pp. 1161-1164, 2006

Giraudet. P, Glotin. H, 'Real-time 3D tracking of whales by precise and echo-robust TDOAs of clicks extracted from 5 bottom-mounted hydrophones records of the AUTECH', int'l Journ. Applied Acoustics, V67 11-12, Impact Factor 0.93, 2006

Glotin. H, Caudal. F, Giraudet. P, 'Whales cocktail party: a real-time tracking of multiple whales' in Int Journ. Canadian Acoustics, V36, ISSN 0711-6659, 2008

Glotin. H, Doh. Y, Abeille. R, Monnin. A, 'Physeter distance estimation using sub-band Leroy transmission loss model', 5th Int'l Workshop DCLDE, 2011

Halkias. X, Paris. S, Glotin. H, 'Classification of Mysticete Sounds: Extracting spectro-temporal structures of calls using sparse architectures' in Jour. Acoustical Society of America http://sis.univ-tln.fr/~glotin/Halkias_Paris_H.Glotin_DNN_bioacoustic_RBM_SAE_JASA_2013.pdf , 2013

Lelandais. F, Glotin . H, 'Mallat's Matching Pursuit of Sperm Whale Clicks in Real-Time using Daubechies 15 wavelets', PASSIVE IEEE explorer online, 5p, 2008

Pace . F, Benard.F, Glotin. H, Adam. O, White. P, 'Automatic clustering of *humpback whale* songs for subunits sequence analyses', Int. Jour App.Acoustics, nov 2010

Paris. S , Doh. Y, Glotin. H , Halkias, X, Razik.J , '*Physeter catodon* localization by sparse coding', ICML4B in ICML 2013 conference, Atlanta, 2013

OS - Ouvrages scientifiques (ou chapitres de) – Rapports PELAGOS – Editions Proceedings

Bénard. H, Glotin. H, 'Highly defined whale group tracking by passive acoustic Stochastic Matched Filter', Intech Book, Advances in sound localization, www.intechopen.com, ISBN 978-953-307-224-1, 23p, 2010
Glotin. H, Adam. O, 'Biotag, procédé de balisage de cétacé biocompatible', dépôt à l'Institut National de la Propriété, 2010

Glotin. H *et al*, Ed. 'Unsupervised Machine Learning for Bioacoustics', Proc. Beijing, joint to ICML, <http://sabiod.univ-tln.fr>, 2014

Collectif GIS3M, avec H. Glotin & F. Bénard, 'Bilan du programme scientifique du GIS dans PELAGOS 2008-2010', Ed. Parc National de Port Cros, 120p, 2010

Glotin. H *et al* Ed. 'Machine Learning for Bioacoustics', Proc. of the first workshop, Atlanta, joint to ICML, 2013, http://sabiod.org/ICML4B2013_book.pdf

Glotin. H *et al* Ed. 'From Neurons to scaled bioacoutics', Proc. of the first workshop, Nevada joint to NIPS, 2013, http://sabiod.org/NIPS4B2013_book.pdf

Glotin. H 'Soundscape semiotics, categorization & localization' Intech Ed, 250p <http://www.intechopen.com/books/soundscape-semiotics-localization-and-categorization>, 2014

Glotin. H *et al*. 'Détection et classification sur transect audio-visuel de populations de cétacés du nord Pelagos-Iles d'Or (DECAV)', UTLN, PELAGOS 11-031, 2011, http://www.sanctuaire-pelagos.org/sensibilisation/bulletins-de-liaison-annuel/doc_download/260-11-031

Glotin. H, Patris. J, Giraudet. P, Malige. F, Razik. J, Paris. S, Prévot. J.M, 'Etude pour protection des cétacés du grand Lagon Sud UNESCO', commandée par Gouvernement de Nouvelle Calédonie, 2013

Laran. S, Glotin. H *et al.* GIS 3M CRC Marineland, UTLN-LSIS, 'Suivi acoustique des populations de cétacés au nord du Sanctuaire Pelagos', PELAGOS 2008-2010, http://www.sanctuaire-pelagos.org/sensibilisation/bulletins-de-liaison-annuel/doc_download/70-08-048

Communications / actes congrès national, diffusions télévisuelles, reportages / brevets

Glotin. H, Giraudet. P, Bénard. F, 'Procédé de trajectographie en temps-réel sur ordinateur portable, de plusieurs cétacés par acoustique passive', Europe et Etats-Unis (http://sis.univ-tln.fr/~glotin/UTLN_patent_whale_USA.pdf) PCT Nouvelle-Zélande, Canada, Australie 2007-2015

Laran. S, Castellote. M, Glotin. H, Benard. F, Lamers. M, 'Comparaison de trois méthodes d'échantillonnage', Actes du 11^e Séminaire Réseau National Echouages, 2009

Laran. S, Castellote. M, Glotin. H, Caudal. F, Lamers. M, 'Programme de Monitoring des cétacés dans le Sanctuaire Pelagos : suivi acoustique des populations de cétacés en Mer Ligure', 10^e Séminaire Réseau National Echouages, Stratégies suivi des populations de mammifères marins, 5p, 2008

Pierantonio. N & Airoidi. S, 'Use of Photogrammetry to estimate sperm whales body length in the Ligurian Sea, 2012 ECS.

Pierantonio. N, Soldano. G, Airoidi. S, 'New IPI to body length in mediterranean male sperm whales', 2016 ECS.

Revue du CNRS, 'Dans le sillage des baleines à bosse', article sur notre projet BAOBAB en suivi des baleines à bosse à Madagascar <https://lejournal.cnrs.fr/articles/dans-le-sillage-des-baleines-a-bosse>, N2, 2014

'Les chercheurs Toulonnais traquent les cétacés dans Pelagos', Var Matin, p. 2-3, juil. 2009 Reportage à [Thalassa](#), sur France Télévision [YouTube http://www.youtube.com/watch?v=INT3-SRE1ik](http://www.youtube.com/watch?v=INT3-SRE1ik), 2013 'Méditerranée, le sanctuaire des baleines' & SABIOD, film France Télévision de 20 min. 03/2013, aussi projeté en première en 02/2013 à l'Institut Océanographique de Monaco <http://www.youtube.com/watch?v=BSvn1gVDWng>, 2013

'Des Kayakistes à l'écoute de la mer et des cétacés', Var Matin, page 4, 2 déc 2013

Autres films ou reportages radiophoniques (Radio France) sur les travaux bioacoustiques de l'équipe DYNI: <http://sabiiod.univ-tln.fr/tv.html>, 2014