

# MONITORAGE ACOUSTIQUE PASSIF DES CAMPAGNES D'OCÉANOGRAPHIE ACOUSTIQUE EN PRÉSENCE DE MAMMIFÈRES MARINS : EXEMPLE DE LA CAMPAGNE ERATO-09

par Cédric Gervaise <sup>(1)</sup>, Lucia Di Iorio <sup>(1)</sup>, Bazile Kinda <sup>(1)</sup>, Yann Stéphan <sup>(2)</sup>, Nicolas Josso <sup>(3)</sup>

## RÉSUMÉ

En septembre 2009, pendant 2 jours, une campagne d'inversion géoacoustique, ERATO-09<sup>(4)</sup>, a été menée dans le golfe de Gascogne par le SHOM. Lors de la veille visuelle, la présence de dauphins communs *Delphinus delphis* a été notée. Dans cet article, nous évaluons a posteriori la faisabilité d'un monitoring par acoustique passive des interactions entre les émissions acoustiques de la campagne et les dauphins en utilisant deux hydrophones autonomes mouillés dans la zone d'expérimentation. Nous évaluons d'abord le supplément de niveau sonore induit par la campagne ERATO-09 en ces deux points de mesure. L'incrément est de 10 dB réf  $1\mu\text{Pa}^2\text{Hz}^{-1}$  en moyenne et 30 dB réf  $1\mu\text{Pa}^2\text{Hz}^{-1}$  au maximum par rapport au bruit ambiant. Afin d'évaluer l'impact éventuel des émissions acoustiques sur le comportement des dauphins (fuite, attraction, adaptation acoustique), nous avons développé un algorithme de détection de mammifères marins par acoustique passive. Cet algorithme permet de détecter les sifflements des dauphins communs dans un rayon de 1 kilomètre avec un taux de détection supérieur à 98 % référencé à une analyse visuelle du spectrogramme des mesures. Des statistiques de détection de sifflements ont été réalisées sur trois différentes phases de mesures utilisant des émissions actives. Compte tenu de la brièveté des événements et de la campagne, il n'a pas été possible de conclure quant à l'impact éventuel des émissions sur le comportement des dauphins. Cette étude montre néanmoins la faisabilité et l'intérêt d'un monitoring par acoustique passive des activités d'inversion géoacoustique et elle identifie des outils adaptés. Ce type d'étude devrait à l'avenir se généraliser afin de mutualiser les résultats et produire une étude statistique conséquente.

## ABSTRACT

*In September 2009, during two days, a geo-acoustic experiment, named ERATO-09, was conducted by SHOM in the Bay of Biscay. During the experiment, the presence of common dolphins (*Delphinus delphis*) has been noticed. In this paper, we retrospectively evaluate the feasibility of passive acoustic monitoring to derive interactions between active acoustic scenarios and dolphin behaviour. Our study is based on measurements obtained by two autonomous hydrophones moored in the experimental area. We first evaluate the additional noise induced by the emissions in these two measurement points. The increment relative to ambient noise is 10 dB  $1\mu\text{Pa}^2\text{Hz}^{-1}$  on average with peak values of 30 dB  $1\mu\text{Pa}^2\text{Hz}^{-1}$ . To assess the possible impact of acoustic emissions on dolphins behaviour (escape, attraction, vocal adjustment), we have developed a detection algorithm. This algorithm can detect whistles of common dolphins within a range of 1 km and with a detection success of 98%. Three active scenarios have been used to analyse the acoustic behaviour of dolphins in terms of whistle rates in relation to the power and type of anthropogenic sounds. The results do not show clear relationships between whistle activity and anthropogenic emissions. This is partly due to the scarcity of events that could be analysed and the short duration of the campaign. Nevertheless, this study shows the feasibility and interest of a passive acoustic monitoring system in conjunction with active experiments and identifies powerful analytical tools. This type of acoustic study should regularly be implemented in the future in order to consistently increase the data set for a more conclusive statistical analysis.*

<sup>(1)</sup> EA3876 et DTN, ENSIETA, 2 Rue François Verny, 29200 Brest, France. Contact : lucia.di\_iorio@ensieta.fr, cedric.gervaise@ensieta.fr

<sup>(2)</sup> SHOM, 13 Rue du Chatellier, CS 92803, 29228 Brest cedex 2, France

<sup>(3)</sup> GIPSA-Lab, Université Stendhal, 38040 Grenoble Cedex 9

<sup>(4)</sup> Evaluation Rapide de l'environnement Acoustique par Tomographie Océanique



## 1. INTRODUCTION

Le bruit anthropique introduit dans l'eau peut susciter des réponses plus ou moins importantes chez les cétacés (Richardson *et al.*, 2005). Les effets sévères portent sur des traumatismes physiques, la perte de l'audition, l'évitement d'un habitat sur le court ou le long terme ainsi que la fuite des animaux. Les effets plus doux portent sur des altérations physiologiques temporaires, des changements de comportement ou des réactions acoustiques, par exemple pour compenser l'interférence du bruit (Southall *et al.*, 2007 ; Clark *et al.*, 2009). Puisque le bruit peut être de différente nature, continu ou répétitif, impulsif ou non, plus ou moins intense, avec des énergies maximales concentrées autour de différentes bandes de fréquence, les réponses des animaux peuvent différer selon l'espèce concernée et le type de sources (Southall *et al.*, 2007).

Afin de limiter les effets nocifs des émissions acoustiques sur les mammifères marins, la plupart des expérimentateurs en acoustique sous-marine appliquent des règles de restrictions d'émission des sonars, généralement basées sur deux principes : d'une part la veille optique préalable et la montée graduelle des émissions acoustiques (procédure dite de "ramp up") et d'autre part la diminution de la puissance voire l'arrêt des émissions en cas de présence avérée de cétacés. Pour autant, il est très difficile de démontrer l'efficacité et même la pertinence de ce type de procédure de limitations des risques sans observations simultanées du comportement des mammifères en présence de cette gêne. Par conséquent, il serait intéressant de compiler systématiquement des données liant émissions acoustiques et comportements des cétacés pour peu que ceux-ci puissent être observés et caractérisés. Pour ce faire, une solution attrayante est de placer dans la zone d'expérimentation des hydrophones qui peuvent à la fois évaluer le chorus anthropique (les sons générés par l'expérimentateur) et le chorus biologique (la production sonore des mammifères marins). Le travail présenté dans cet article est une illustration de ce concept de monitoring passif. Il s'appuie sur l'analyse comparée des mesures réalisées lors d'une campagne d'océanographie acoustique, la campagne ERATO-09, conduite par le SHOM sur le plateau armoricain.

La campagne ERATO-09 avait pour but la caractérisation géoacoustique des fonds marins. Elle combinait pour cela l'utilisation d'un système de tomographie géoacoustique, un sondeur de sédiment et un sondeur multifaisceau. La veille visuelle a montré la présence régulière de dauphins communs *Delphinus delphis* dans la zone de travail. Pour limiter les interactions entre émissions acoustiques et mammifères marins, une procédure de restriction des émissions sonore (SHOM, 2009), a été mise en œuvre. Cette procédure prévoyait notamment un suivi visuel renforcé, des phases de "ramp up", une diminution des émissions en cas de présence lointaine avérée et un arrêt des émissions en cas de présence proche. Malgré ces mesures de limitations, de nombreux dauphins ont été observés sur la zone d'expérimentation. Ces dauphins ont donc été exposés à différents types de bruits anthropiques sous forme de sons modulés en très basse fréquence (source de tomographie géoacoustique) et des séries de signaux impulsifs avec des bandes de fré-

quence se chevauchant avec les vocalisations des dauphins (sondeurs). Afin d'évaluer un lien éventuel entre leur comportement et les facteurs de pression induite par les émissions sonores, deux enregistreurs de sons autonomes ont été posés sur le fond (points de mesure PAM : Passive Acoustic Monitoring) dans la zone. Le but de cet article est d'évaluer l'intérêt d'un tel monitoring en mettant en place des outils de traitement de vocalisations de cétacés, en expérimentant une étude d'impact consistant à rechercher les comportements de fuite ou d'attraction des mammifères marins lors de la mise en marche ou de l'arrêt des émissions actives, et en évaluant des adaptations possibles de la production sonore comme par exemple l'augmentation du taux de vocalisation pour contrer le masquage acoustique.

Dans la première partie, nous présentons la campagne ERATO-09. La deuxième partie évalue la puissance sonore introduite par la campagne aux deux points de mesure PAM. Dans la troisième partie, les mesures PAM sont utilisées pour caractériser les niveaux sonores produits par les dauphins communs. Dans la quatrième partie, nous proposons un algorithme de détection automatique que nous mettons en œuvre sur la campagne ERATO-09. La cinquième partie utilise les résultats du suivi PAM pendant la campagne pour évaluer l'impact des émissions acoustiques actives sur les dauphins. L'article s'achève par les conclusions et perspectives.

## 2. LA CAMPAGNE ERATO-09

La campagne ERATO-09, conduite par le Service hydrographique et océanographique de la marine (SHOM), s'est déroulée du 6 au 13 septembre 2009 dans le golfe de Gascogne sur le plateau continental (142 m de profondeur) à bord du N/O *L'Atalante*. L'objectif principal de la campagne était d'évaluer le fonctionnement d'un démonstrateur de système d'inversion géoacoustique (système STEREO). Les opérations à la mer ont consisté en deux types de travaux :

- le déploiement d'un système d'émission acoustique à très basses fréquences et de systèmes de réception (4 bouées dérivantes - bouées STEREO, une antenne mouillée sur le fond - bouée TELEMAQUE et deux enregistreurs acoustiques autonomes - AURAL M2),
- la réalisation de mesures d'imagerie acoustique et de structure des sédiments par sondeurs multifaisceaux et sondeur de sédiment.

Le tableau 1 présente les caractéristiques principales des équipements utilisés.

Le tableau 2 présente le calendrier des principales phases de la campagne ERATO-09 et identifie celles pour lesquelles le monitoring par acoustique passive a été réalisé.

Le monitoring par acoustique passive a été effectué pendant deux jours en continu et contient des enregistrements simultanés aux phases d'inversion géoacoustique et aux phases de levés au sonar bathymétrique et au sondeur de sédiment. La figure 1 présente les positions relatives des points de monitoring et du bâtiment émetteur durant les phases 3, 4, 5, 7 et 8.

SYSTÈMES D'ÉMISSION				
Modèle / caractéristiques	Bande des émissions (kHz)	Niveau d'émission dB (réf. $1 \mu Pa_{rms}^2 @ 1m$ , ordre de grandeur)	Directivité	
STEREO	De 0.7 à 2.2	198 (max) 192 (nominal)	Omnidirectionnelle	
SMF	De 10 à 14	> 220	Verticale latérale	
SBP	De 1.8 à 5.2	> 220	Verticale	
SYSTÈMES DE RÉCEPTION				
Modèle	Nombre d'hydrophones	Bande d'écoute (kHz)	Fréquence d'échantillonnage (Hz)	Nombre de bits de quantification
STEREO	4	0.05 à 2	6 400	16
TELEMAQUE	6	0.05 à 2.2	8 192	16
AURAL	1	0.005 à 16	32 000	16

Tableau 1 : principales caractéristiques de l'instrumentation pour l'inversion géoacoustique.

Phase	Période (année 2009)		Monitoring par acoustique passive
	Début	Fin	
Phase 1 : transit et test	06 Septembre, 16 h	08 Septembre, 6 h	NON
Phase 2 : inversion géoacoustique 1	08 Septembre, 7 h	08 Septembre, 16 h	NON
Phase 3 : inversion géoacoustique 2	09 Septembre, 8 h	09 Septembre, 20 h	OUI
Phase 4 : inversion géoacoustique 3	10 Septembre, 6 h	10 Septembre, 20 h	OUI
Phase 5 : inversion géoacoustique 4	11 Septembre, 6 h	11 Septembre, 14 h	OUI
Phase 6 : multifaisceaux et sondeur	08 Septembre, 20 h	09 Septembre, 7 h	NON
Phase 7 : multifaisceaux et sondeur	09 Septembre, 20 h	10 Septembre, 6 h	OUI
Phase 8 : multifaisceaux et sondeur	10 Septembre, 20 h	11 Septembre, 6 h	OUI

Tableau 2 : principales phases de la campagne ERATO-09.

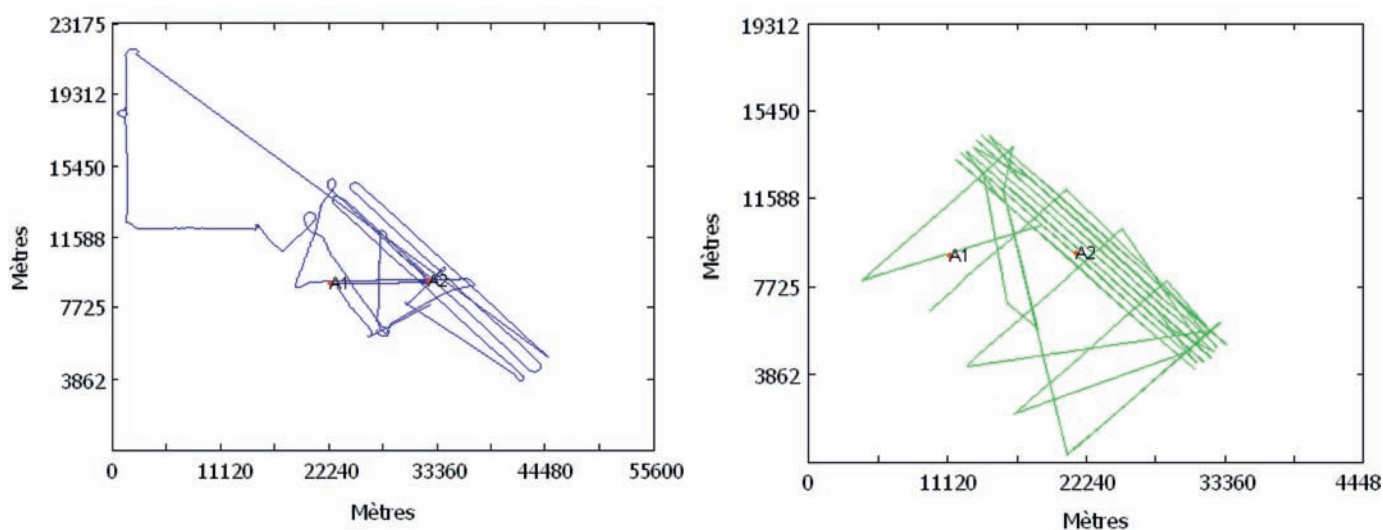


Figure 1 : Carte des phases d'ERATO-09 simultanées aux enregistrements PAM, à gauche les phases d'inversion géoacoustiques, à droite les phases de levés bathymétriques, les enregistreurs autonomes (PAM) sont repérés par les points A1 et A2.

### 3. ÉVALUATION DE LA PUISSANCE SONORE INTRODUITE PAR ERATO AUX POINTS DE MESURE PAM

Les deux points de mesure PAM ont été utilisés pour détecter la présence des dauphins dans leur voisinage et caractériser leur réponse acoustique aux émissions actives. Pour les deux points de mesure PAM, nous avons évalué les propriétés statistiques du bruit ambiant (terme qui conditionne le rayon de détection du système PAM) dans la zone d'expérimentation ainsi que le niveau sonore introduit par les émissions de la campagne ERATO-09 (terme qui potentiellement provoque une nuisance). Pour cela, à chaque instant de mesure, une fenêtre rectangulaire glissante d'une longueur de 2 048 échantillons a été appliquée à l'ensemble des enregistrements avec un taux de recouvrement de 50 %. Pour chaque position de fenêtre, une densité spectrale de puissance a été calculée par une méthode de périodogrammes. Ces réalisations successives de la densité spectrale de puissance ont été mises en mémoire pour finalement bâtir une courbe de densité de probabilité de cette densité spectrale de puissance. Ce traitement a permis d'obtenir la densité de probabilité en niveau NO en fonction de la fréquence. La figure 2 représente des extraits de cette analyse en choisissant une heure d'enregistrement autour des deux points de mesure PAM présentant des émissions géoacoustiques (phases 3, 4, 5) et des émissions du sondeur de sédiment et du sonar bathymétrique (phases 7, 8).

### 3.1 Niveau de bruit ambiant dans la bande d'émission des dauphins communs

Les quatre cartes de densité de probabilité présentent la même répartition des niveaux sonores mesurés. Les niveaux les plus probables correspondent au spectre du bruit ambiant dans la zone. A partir de 10 kilohertz, le niveau de bruit ambiant est approximativement constant égal à 50 dB réf.  $1\mu\text{Pa}^2\text{Hz}^{-1}$ .

### 3.2 Supplément du niveau de bruit introduit par l'inversion géoacoustique

Les cartes de densité de probabilité (panels a et b) correspondant à la présence d'émissions géoacoustiques présentent des niveaux probables s'écartant du pied de bruit entre 300 hertz et 2 kilohertz. Cette augmentation est la contribution des émissions géoacoustiques au bruit ambiant. En prolongeant les niveaux de bruit ambiant avant 300 hertz et après 2 kilohertz sur la bande comprise entre 300 hertz et 2 kilohertz, on obtient une estimée du bruit ambiant. En comparant ce niveau estimé à ceux mesurés, on montre que l'inversion géoacoustique apporte un supplément moyen de 10 dB et maximal de 30 dB par rapport au bruit ambiant.

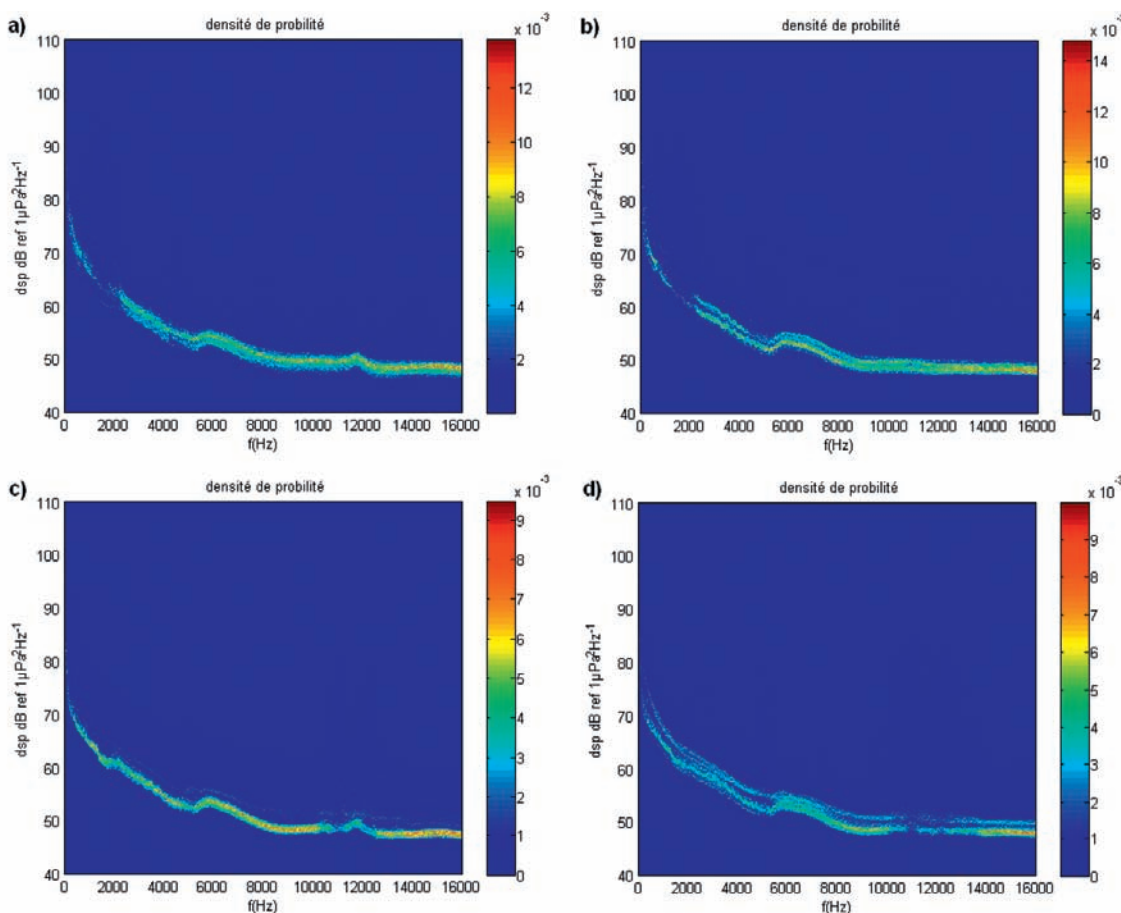


Figure 2 : Densités de probabilité des mesures passives lors des phases présentant des inversions géoacoustiques; a) AURAL 1, b) AURAL 2 et densité de probabilité des périodes de levé bathymétrique (SMF et SBP) pour c) l' AURAL 1 et d) l' AURAL 2.

### 3.3 Supplément du niveau de bruit introduit par le sondeur multifaisceau

Les cartes de densité de probabilité (figure 2, panels c et d) correspondant à la présence d'émissions du sondeur multifaisceau présentent des niveaux probables s'écartant du pied de bruit entre 10 kilohertz et 14 kilohertz. Cette augmentation est la contribution des émissions sonar au bruit ambiant. En prolongeant les niveaux de bruit ambiant avant 10 kilohertz et après 14 kilohertz sur la bande comprise entre 10 kilohertz et 14 kilohertz, on obtient une estimée du bruit ambiant. En comparant cette estimée aux niveaux mesurés, on montre que le sondeur bathymétrique apporte un supplément moyen de 10 dB et maximal de 40 dB par rapport au bruit ambiant.

### 4. ÉVALUATION ET CARACTÉRISATION DE LA PRODUCTION SONORE DES DAUPHINS COMMUNS AUX POINTS DE MESURE PAM

L'étape suivante de notre étude est de caractériser la production sonore des dauphins à partir des enregistrements. Les algorithmes de détection que l'on va utiliser sont basés sur l'utilisation de spectrogrammes (Gervaise *et al.*, 2010). La pente des lois de modulation des sifflements et leur niveau émis conditionnent les performances de ces algorithmes. Dans un premier temps, nous avons estimé ces caractéristiques à partir des données enregistrées par les deux points de mesure PAM. Pour cela, nous avons parcouru les enregistrements et sélectionné une série de 70 vocalises de dauphins présentant nettement 3 échos relatifs à trois trajets de propagation distincts (trajet direct, trajet réfléchi surface et trajet réfléchi fond). Pour chaque vocalise de ce type, la bande fréquentielle et la durée sont relevées et la puissance moyenne reçue est calculée. La position du dauphin émettant est estimée à partir des temps de trajet des 3 échos en supposant une propagation dans une colonne d'eau isocélère (Au *et al.*, 2008). La puissance moyenne émise à un mètre est alors reconstruite à partir de la puissance moyenne reçue en la corrigeant des pertes de transmission sphérique calculées grâce à la position estimée de la source. Le tableau 3 présente les propriétés des vocalises sélectionnées.

### 5. DÉTECTION AUTOMATIQUE DE LA PRÉSENCE DE MAMMIFÈRES MARINS PAR PROCÉDÉS PAM

Il existe de nombreux outils et méthodes disponibles pour détecter les mammifères marins à partir d'enregistreurs autonomes. Comme nos enregistreurs sont limités à une fré-

quence d'échantillonnage de 32 768 hertz, seuls les sifflements sont mesurables. En suivant les tendances de la communauté, nous avons développé une chaîne de traitement nommée "BioSound - ENSIETA". Pour détecter ces sifflements, nous formons le spectrogramme des mesures, ce qui permet d'en améliorer le rapport signal à bruit et de représenter celles-ci dans un espace apte à reconnaître les modulations de fréquence caractéristiques des sifflements. D'autre part, le spectrogramme est à ce jour le seul outil permettant des applications temps réel. Au sein de ce spectrogramme, les pixels statistiquement plus énergétiques que leurs voisins sont sélectionnés et au sein de cet ensemble, ceux organisés en modulation de fréquence sont retenus. Finalement, tout en gardant en mémoire l'intégralité des pixels temps - fréquence retenus, ces derniers sont exprimés en une seule quantité : une métrique résumant l'activité acoustique des animaux. Parmi un large choix de métriques, nous avons retenu le taux de couverture temporelle défini comme la proportion de temps couverte par des sifflements pendant une période donnée. Pour cette étude, nous avons retenu une période de référence de 20 secondes. La figure 3 présente des exemples de sorties de nos outils appliqués aux données ERATO-09.

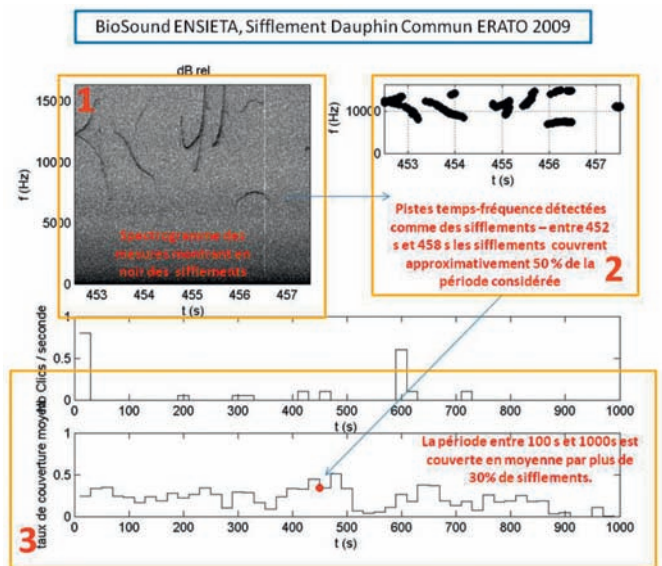


Figure 3 : Exemple de sortie de notre algorithme de détection des sifflements.

En complément de cette phase de détection, nous avons déterminé la portée de détection des PAM par l'application de l'équation du SONAR passif :

$$SL + TL(R) + GT - NL > SD,$$

équation que l'on détaille dans la suite.

Propriétés	Valeur moyenne	Ecart type
Niveau émis (dB réf 1µPa rms@ 1m)	142	8
Durée (s)	0.34	0.17
Bande (Hz)	5 400	1 600
Pente modulation (Hz/s)	20 200	13 200

Tableau 3 : caractéristiques principales des vocalises de dauphins durant la campagne ERATO-09.

- Le terme *SD* est un seuil de détection et correspond au point de fonctionnement au-delà duquel notre détecteur ne fonctionne plus ou au delà duquel la métrique acoustique extraite n'est plus fiable. Ce point de fonctionnement correspond à détecter dans le spectrogramme 50 % des pixels appartenant effectivement à un sifflement tout en ajoutant au maximum 10 % de fausses alarmes. Ce point de fonctionnement est obtenu pour un rapport signal à bruit après formation du spectrogramme supérieur ou égal à 9 dB.
- Le terme *GT* correspond au gain de traitement. En choisissant une longueur de fenêtre FFT adaptée à la pente moyenne des vocalises, soit 100 millisecondes, on trouve le gain de traitement induit par le calcul du spectrogramme égal à 17 dB.
- Le terme *SL* est le niveau émis, soit 142 dB dans notre cas.
- Enfin, le terme *NL* est le niveau de bruit, égal à la densité spectrale de bruit exprimée en dB plus 10 fois le logarithme en base 10 de la bande du sifflement ( $50+10\log(5\ 400)$ ) soit 87 dB.

Au bilan, on arrive aux pertes de transmission admissibles  $TL(R)>-61$  soit une portée de 1 000 mètres sous l'hypothèse conservatrice des pertes sphériques.

Suite à l'application de nos outils sur la totalité des enregistrements réalisés durant ERATO-09, nous avons évalué les performances en termes de probabilité de détection et de fausse alarme en confrontant les résultats de détection et les signaux réels. Dix fenêtres d'une durée totale d'une heure ont été choisies dans la base. Les critères de sélection sont la présence ou l'absence d'activité anthropique dans les données acoustiques ainsi que la présence ou l'absence de sifflements détectés par *BioSound*. Ceci permet entre autre de vérifier l'influence sur la détection de sources acoustiques autres que les sifflements. Dans chaque fenêtre d'une heure, une minute a été validée visuellement toutes les 10 minutes. La minute de traitement a été visualisée par pas de 0.8 secondes, ce qui correspond à une durée moyenne de sifflement. Une comparaison entre la présence ou absence d'un sifflement entre le spectrogramme (données réelles) et la fenêtre de détection (figure 3) a été fait pour tous les pas de 0.8 secondes. Ceci a permis d'obtenir les fausses détections et les sifflements manqués. Le taux de succès de *BioSound* a ainsi pu être calculé et représenté pour chaque "état acoustique" (émission géoacoustique, levé bathymétrique, absence d'émissions actives). Le Tableau 4 présente les résultats de l'analyse de performances du détecteur.

La figure 4 présente les résultats de la détection pour l'hydrophone 1. On fait apparaître avec un "D" les vrais positifs correspondant à la détection des sifflements et avec un "MF-S" les faux positifs correspondant aux détections des signaux de sondeurs de sédiments et de sonars bathymétriques.

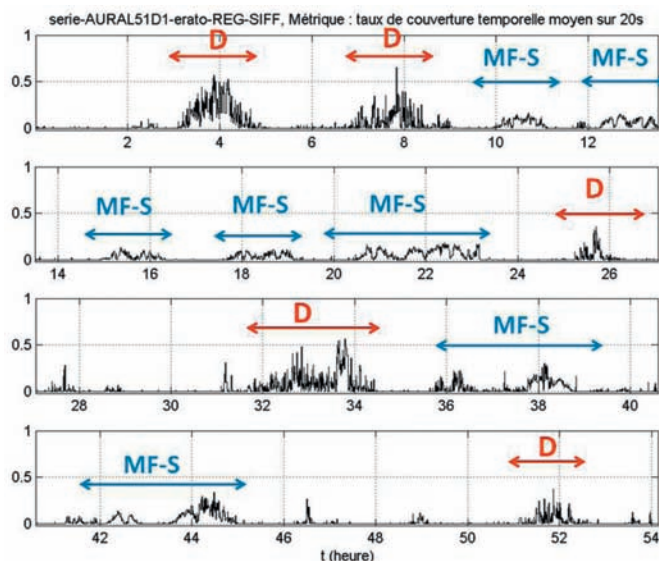


Figure 4 : Résultat de l'algorithme de détection des sifflements appliqué sur 54 heures d'enregistrement durant ERATO-09.

Notre outil de détection est performant pour la détection des sifflements mais doit être complété par une étape de réjection des faux positifs dus aux émissions des sondeurs de sédiment et des sondeurs bathymétriques. Ces émissions provenant de sondeurs ont un contenu temps - fréquence bien calibré et stable dans le temps, nous avons utilisé ce fait pour définir des gabarits typiques de ces émissions que nous avons alors recherchés dans le spectrogramme de nos mesures. La date des présences de ces gabarits au sein du spectrogramme a été mise en mémoire et en ces dates, nous avons interdit toute détection de sifflements. Cette méthode de réjection a permis d'éliminer la grande majorité des faux positifs. Cette recherche automatique de gabarit dans l'espace temps - fréquence a été réalisée avec l'outil XBAT ([www.xbat.org](http://www.xbat.org), Figueroa *et al.*, 2008).

Etat acoustique	Faux positifs * (%)	Faux négatifs ** (%)	Taux de succès <i>BioSound</i> (%)
Absence d'émissions actives (N = 2 750)	0	2.1	97.9
Emissions géoacoustiques (N = 875)	0.24	0.24	99.52
Levé bathymétrique (N = 875)	27.6	0	72.4

\* Faux positifs : fausses détections

\*\* Faux négatifs : sifflements manqués par *BioSound*

Tableau 4 : Résultats de l'étude des performances de détection des sifflements par *BioSound* par gamme d'état acoustique, performances évaluées à partir de N périodes de 0.8 s.

## 6. RECHERCHE D'IMPACT DE LA CAMPAGNE ERATO SUR LES MAMMIFÈRES À PARTIR DES OUTILS PAM

### 6.1 Impact potentiel des émissions acoustiques.

Pendant le temps d'enregistrement des AURAL, trois phases d'inversion géoacoustique ont été "monitorées", avec des durées d'émission respectivement de 5 heures, 4 heures 20 minutes et 2 heures (figure 5a). En raison du manque d'observations visuelles des dauphins communs autour des AURAL, le nombre d'animaux était inconnu et leur présence est uniquement déterminée par la détection de vocalisations sur les enregistrements. Pour évaluer si les émissions acoustiques ont une influence sur le comportement vocal des dauphins communs, les taux de sifflements calculés pour toute période d'analyse de 20 secondes incluse dans les 30 premières minutes de chaque série d'émission ont été comparés aux taux de sifflements des périodes incluses dans les 30 minutes précédentes, sans émissions actives (*début*). Le même principe a été appliqué pour les 30 dernières minutes de chaque série d'émissions suivies par 30 minutes où les émissions ont été stoppées (*fin*) (figure 5a). Ce plan de comparaison de périodes sans et avec émissions acoustiques a été choisi pour éviter un effet sur le taux de sifflements dû à la densité de dauphins présents. En fait, puisque les passages de dauphins dans la zone de détection acoustique des AURAL duraient environ deux heures (figure 5), il est présumé que les sifflements enregistrés à chaque AURAL pendant une heure (paires de 30 minutes avec et sans émission) provenaient du même groupe de dauphins. Les analyses statistiques ont été faites en regroupant les trois *débuts* des deux AURAL ainsi que les trois *fins*. Le regroupement des deux AURAL dans une même analyse est justifié par le fait qu'un groupe de dauphins ne pouvait pas être détecté sur les deux capteurs en même temps, le rayon de détection de sifflements des AURAL (autour de 1 000 m)

étant nettement inférieur à la distance entre les AURAL – environ 7 000 mètres) et que les taux de sifflements étaient donc indépendants.

Le modèle statistique utilisé pour étudier l'effet des émissions acoustiques sur la production de sifflements est un modèle linéaire général (MLG) avec distribution de quasi-Poisson incluant les interactions entre le taux de sifflements, les séries d'émissions et les AURAL. Les modèles ont été implémentés dans le programme R (version 2.10.0, The Foundation for Statistical Computing 2009).

Les analyses des débuts des séries de "pings" montrent que les dauphins vocalisaient plus dans les 30 min avant l'activation des émissions que pendant (MLG : N = 1 091, d.f. = 1 084,  $\chi^2 = -2.11$ , P = 0.03). Cet effet était surtout visible sur l'AURAL 1 (MLG : N = 1 091, d.f. = 1 084,  $\chi^2 = -1.86$ , P = 0.06) (figure 6a). Aucune des interactions était significative (émission acoustique (oui/non) \* série de "pings" :  $\chi^2 = 1.1$ , P = 0.28 ; série de "pings" \* AURAL :  $\chi^2 = -1.4$ , P = 0.16 ; AURAL \* Emission acoustique :  $\chi^2 = 1.78$ , P = 0.08). Il faut quand même remarquer que la première phase d'inversion géoacoustique influence majoritairement les résultats (figure 6b). Les analyses des fins des séries de "pings" montrent que les dauphins vocalisaient plus dans les 30 min suivant la fin des émissions que pendant (MLG : N = 1 044, d.f. = 1 037,  $\chi^2 = 2.75$ , P = 0.006). L'interaction entre "émission acoustique" (oui/non) et AURAL était significative ( $\chi^2 = -2.08$ , P = 0.04), ce qui montre une différence entre les AURAL et un résultat fortement influencé par les données de l'AURAL 2 (figure 6c). Malgré juste une tendance à un effet de l'interaction des séries de "pings" avec les AURAL ( $\chi^2 = 1.91$ , P = 0.06) et aucun effet avec l'émission acoustique ( $\chi^2 = -1.7$ , P = 0.09), il est évident que c'est la troisième série de "pings" de l'AURAL 2 qui a principalement déterminé ces résultats (Figure 6d).

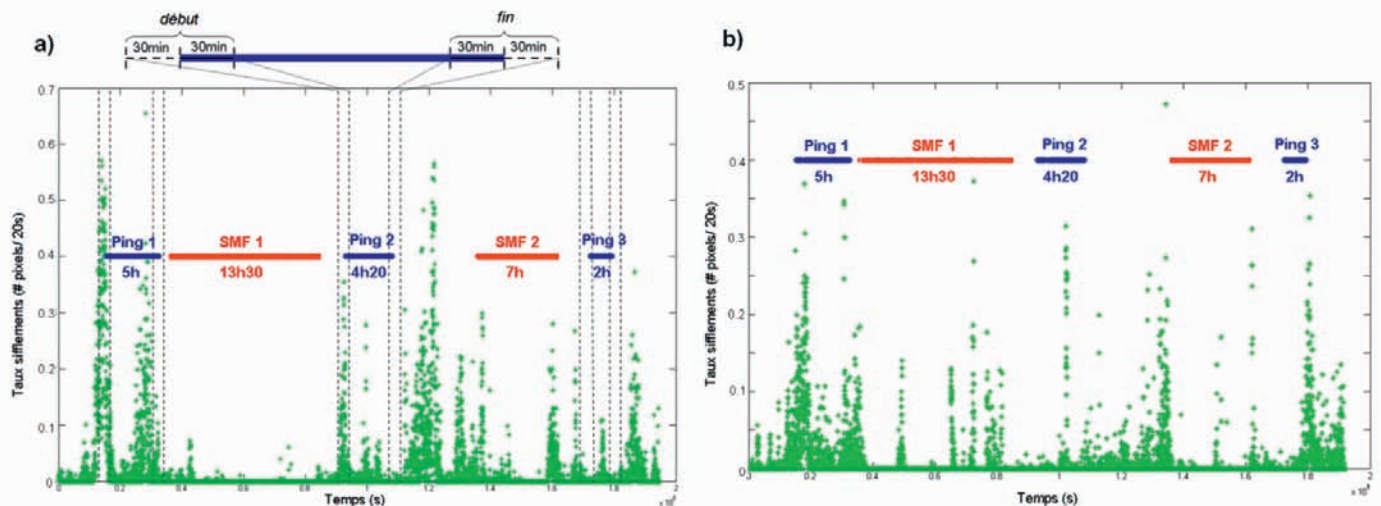


Figure 5 : Illustration des taux de sifflements pendant toute la période d'enregistrement pour l'AURAL 1 (a) et l'AURAL 2 (b). Les pics verts correspondent aux détections de sifflement au passage des dauphins dans la zone de détection. La durée des pics est d'environ 2 h. En bleu, les séries d'émissions acoustiques, en rouge les séries de levés bathymétriques. L'insertion en haut dans a) illustre le choix des six blocs d'une heure (lignes pointillées) choisi pour les analyses des phases d'inversions géoacoustiques ; *début* : 30 min avant le début des émissions (ping) combinés aux 30 min adjacentes pendant les séries de "pings" ; *fin* : 30 min à la fin des séries de "pings" suivis par 30 min après l'arrêt des émissions de "pings".

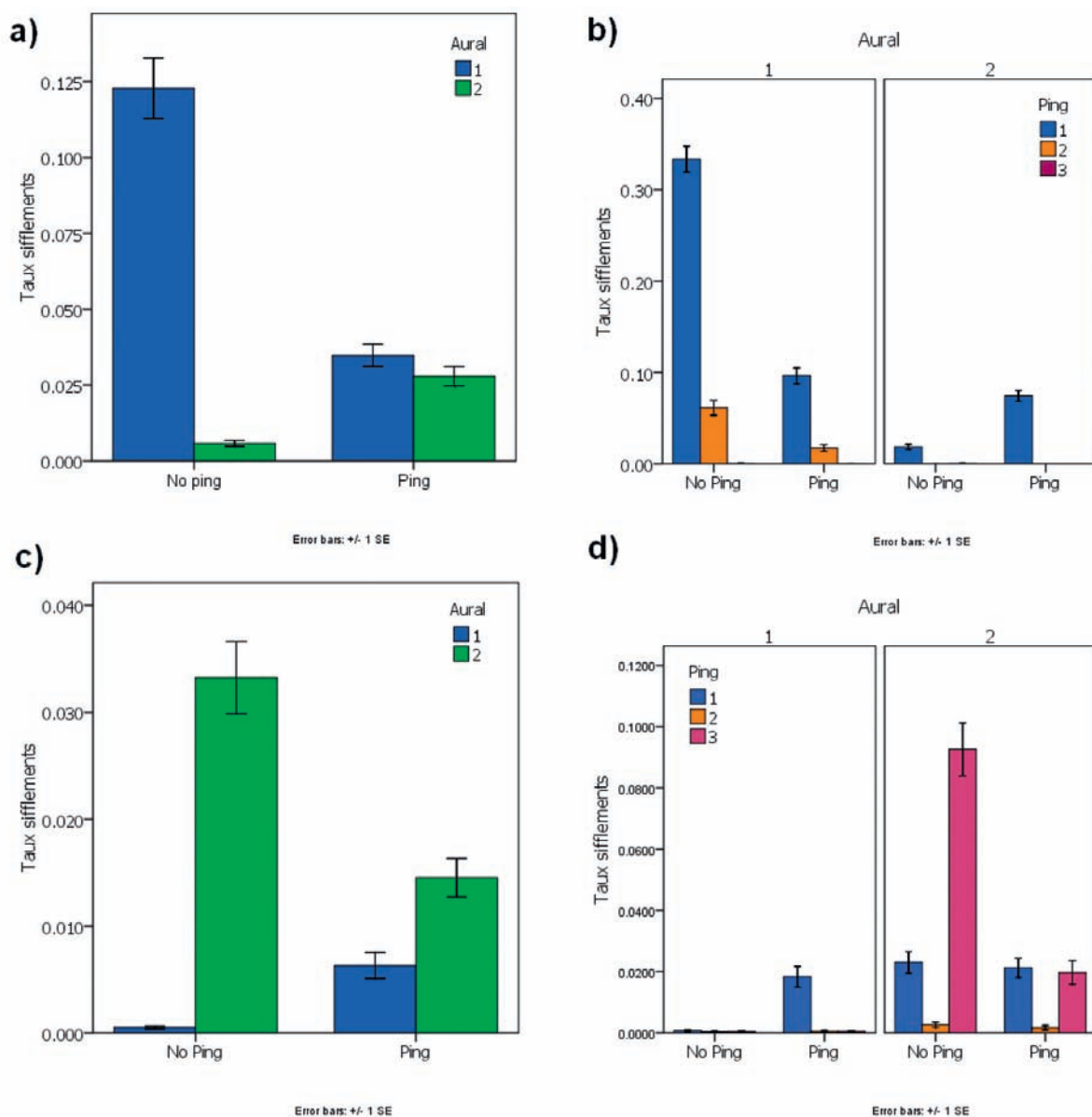


Figure 6 : Illustration des résultats du taux de sifflement en fonction des "pings = émissions géoacoustiques" pour chaque AURAL. a) et b) indiquent les résultats pour les analyses des *débuts*, c) et d) ceux des *fin*s. Dans a) et c) les taux de sifflements des analyses des trois séries de "pings" sont cumulés, tandis que dans b) et d) les contributions de chaque série de "pings" sont illustrées séparément (3 couleurs).

## 6.2 Impact potentiel du levé bathymétrique

Pendant le temps d'enregistrement des AURAL, deux levés bathymétriques ont été effectués avec des émissions d'impulsions continues, détectables sur les AURAL pendant environ 13 heures 30 et 7 heures respectivement. (figure 5a). Ces levés ont été effectués tard le soir et la nuit. Puisque dans le cas du SMF il s'agit d'une source acoustique très directionnelle, les niveaux reçus aux capteurs variaient fortement en fonction de la position relative du navire. Ces variations concernaient non seulement l'intensité du signal reçu, mais aussi la bande de fréquence d'énergie maximale. Une analyse comparant des périodes sans et avec impulsions comme dans le cas des phases d'inversions géoacoustiques n'était donc pas possible. Dans ce papier, les analyses par rapport au SMF se réduisent uniquement à des représenta-

tions graphiques des taux de sifflements durant ces phases.

La comparaison des taux de sifflements sur l'ensemble des enregistrements, indique que les périodes des levés bathymétriques étaient celles avec la moindre activité vocale, ce qui était vrai pour les deux capteurs, l'AURAL 2 en particulier (figure 7). Les densités de probabilité des spectres des niveaux acoustiques des périodes des levés (figure 2c et d) montrent quelques différences entre les deux capteurs. Sur l'AURAL 2, la probabilité d'avoir de l'énergie dans la bande de fréquence de 2 kHz à 5 kHz et surtout de 10 à 14 kHz est supérieure à celle de l'AURAL 1. Cela concorde avec la trajectoire du bateau qui, pendant les levés, se tenait plus proche de l'AURAL 2 que de l'AURAL 1 (figure 1).

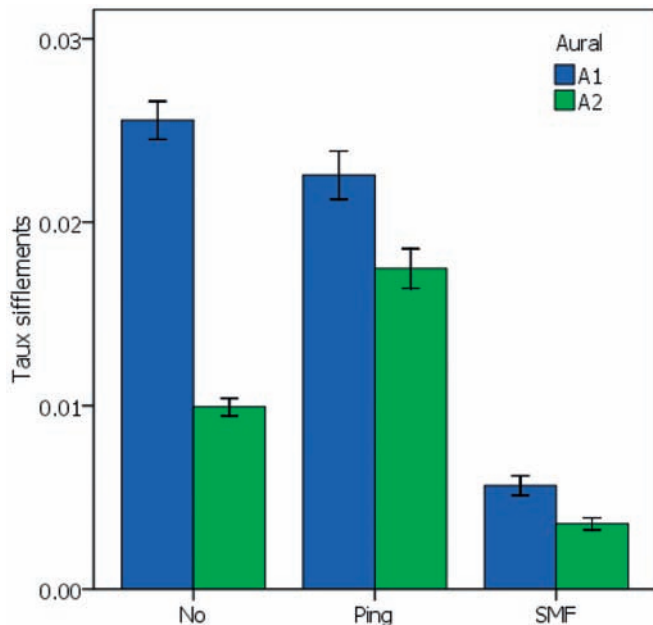


Figure 7 : Illustration des taux de sifflement pour l'ensemble des enregistrements pour les deux AURAL. No = pas d'émission anthropique, "Ping" = émissions POISSON, SMF = émissions sondeur multifaisceau et sondeur de sédiment.

## 7. DISCUSSION

Les dauphins étaient présents et vocalement actifs pendant tout le temps d'enregistrement. En raison du manque de données acoustiques dans la même zone en absence des activités d'ERATO, une comparaison avec les conditions naturelles n'était pas possible. Cependant, la présence de dauphins tout le long de la campagne indique que les émissions d'ERATO n'ont pas provoqué de réactions drastiques, comme l'évitement de la zone pendant la durée de la mission. C'est aussi attesté par les fréquentes approches des dauphins du bateau, observés sporadiquement par les membres de l'équipage, même pendant les émissions acoustiques (Stéphan, Josso & Kinda, communication personnelle).

Pour l'évaluation de l'impact de la campagne ERATO-09 sur la communication vocale des dauphins, les analyses ont été faites en fonction de deux sources acoustiques avec des caractéristiques très différentes, les émissions pour l'inversion géoacoustique et les sondeurs et sonars bathymétriques. Le comportement vocal par rapport aux séries de "pings" utilisés pour l'inversion géoacoustique a révélé que les dauphins sifflaient davantage juste avant le début et après la fin des séries de "pings" de basse fréquence. Ce résultat pourrait indiquer une diminution de communication sociale pendant la période des émissions. Cependant, le comportement vocal différait entre les capteurs, et les analyses étaient fortement influencées par deux événements seulement, un pour chaque capteur. En considérant la carence d'événements statistiques (six en tout) et le manque d'observations comportementales visées des dauphins présents dans la zone d'enregistrement, il est impossible d'extraire des conclusions définitives. Par exemple, le pic de vocalisations juste avant le début des émissions pourrait être dû au passage du navire (sans émissions) dans la zone des

dauphins qui a provoqué une augmentation de sifflements. Par ailleurs, la diminution de vocalisations juste après ce pic pourrait indiquer que les dauphins ont quitté la zone de détection du capteur et n'ont pas nécessairement cessé de vocaliser. Pour valider les résultats obtenus, il est donc indispensable d'agrandir la base de données et d'inclure un protocole d'observation visuelle des dauphins surtout aux passages sur les capteurs acoustiques, avec et sans émission acoustiques.

Quant aux observations de la communication vocale en fonction des levés bathymétriques, une diminution nette de la production de sifflements a été enregistrée pendant toute la durée des émissions SMF sur les deux capteurs. Cette diminution n'était pas nécessairement due à une absence de dauphins car des longs bouts de clics d'écholocation ont été enregistrés (données non publiées). Contrairement aux fréquences basses des "pings" pour la géoacoustique, les impulsions du SMF pourraient interférer directement avec la communication sociale des dauphins à cause du chevauchement de la bande de fréquence des impulsions avec celle des sifflements. Par conséquent, les vocalisations pourraient être masquées. Une diminution, voir une cessation de vocalisations en réponse au masquage, a été décrit pour différentes espèces de cétacés (i.e. Gordon *et al.*, 2004). Le masquage implique une forte réduction de l'espace de communication des animaux (Clark *et al.*, 2009). Bien qu'une forte diminution des taux de sifflements ait été observée dans cette étude, les données disponibles ne permettent pas une évaluation de l'hypothèse de masquage. Tenant compte de la variabilité des niveaux des impulsions du SMF reçus aux capteurs, il serait nécessaire d'inclure ces niveaux dans les analyses, afin d'évaluer une possible corrélation entre le changement d'activité vocale et l'intensité de l'interférence acoustique due au SMF. Puisque les levés bathymétriques ont été effectués pendant la nuit, la diminution des sifflements pouvait être aussi liée à des comportements nocturnes naturels, comme la chasse. En fait, les dauphins communs sont connus pour se nourrir principalement pendant la nuit (Pusineri *et al.*, 2007, Brophy *et al.*, 2009, Evans, 1994). Pour une étude adéquate de l'impact du SMF sur la communication sociale des dauphins communs, il serait nécessaire d'effectuer des enregistrements nocturnes sous des conditions naturelles dans la même zone et de dérouler les levés bathymétriques avec des observations visuel-acoustiques des dauphins aussi pendant le jour.

## 8. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Une série d'outils a été présentée et mise en œuvre pour réaliser une étude d'impact par acoustique passive d'une mission d'inversion géoacoustique dans le golfe de Gascogne sur des dauphins communs présents lors de la mission. Pour cela deux hydrophones autonomes ont été mouillés, leurs mesures ont été analysées par un algorithme de détection qui procure un rayon de détection de 1 kilomètre autour du point d'ancrage. L'analyse de l'impact potentiel a été réalisée en comparant les taux de détections avant et après la mise en route ou l'arrêt des sources actives. Les outils se sont montrés efficaces et ces derniers ainsi que la méthodologie d'analyse proposée peuvent servir de canevas à un protocole à mettre en œuvre régulière-

ment. Cependant la durée d'observation de la campagne a généré uniquement 6 événements analysables dont il est difficile de tirer des conclusions. Dans cette optique, il serait intéressant de multiplier ces études et d'en mutualiser les résultats afin d'en extraire un impact ou pas.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier la Direction générale de l'armement (DGA, France) pour le financement de cette étude via le PEA ERATO (contrat de recherche SHOM-ENSIETA 07CR001).

## BIBLIOGRAPHIE

AU W. W. L., HASTINGS M. C., 2008: "Principles of marine bioacoustics". *Modern Acoustics and Signal Processing Series* (Springer, DOI: 10.1007/978-0-387-78365-9).

BROPHY J. T., MURPHY S. & ROGAN E., 2009: "The diet and feeding ecology of the short-beaked common dolphin (*Delphinus delphis*) in the northeast Atlantic". *Report to the Scientific Committee of the International Whaling Commission* (SC/61/SM 14, pp. 1-18).

CLARK C. W., ELLISON W. T., SOUTHALL B. L., HATCH L., VAN PARIJS S. M., FRANKEL A. & PONIRAKIS D., 2009: "Acoustic masking in marine ecosystems: intuitions, analysis and implication". *Marine Ecology Progress Series* (vol. 395, pp. 201-222).

EVANS W. E., 1994: "Common dolphin, white-bellied porpoise *Delphinus delphis* Linnaeus", 1758. *Handbook of Marine Mammals* (Ed. by RIDGEWAY S. H. & HARRISON S. R. pp. 191-224, London, UK, Academic Press).

FIGUEROA H. & ROBBINS M., 2008: "XBAT: An Open-Source Extensible Platform for Bioacoustic Research and Monitoring". Conference "Computational bioacoustics for assessing biodiversity". *Proceedings of the International Expert meeting on IT-based detection of bioacoustical patterns* ([http://www.biodiv-chm.de/Konvention/F10052472515/Documents/Skript234\\_Bioacoustic](http://www.biodiv-chm.de/Konvention/F10052472515/Documents/Skript234_Bioacoustic) December 7<sup>th</sup>, 10<sup>th</sup> 2007 at the International Academy for Nature Conservation (INA), Isle of Vilm, Germany).

GERVAISE C., SIMARD Y., IOANA C., BUSSON S., ANDRÉ M., 2010 : "Une méthode pour évaluer et optimiser les performances des détecteurs de mammifères marins par acoustique passive" (accepté pour publication). *Revue Acoustique et Techniques*.

GORDON J., GILLESPIE D., POTTER J., FRANTZIS A., SIMMONDS M. P., SWIFT R. & THOMPSON D., 2004: "A Review of the effects of seismic surveys on marine mammals". *Marine Technology Society Journal*, (vol. 37, pp. 16-34).

RICHARDSON J. W., GREENE Jr. C. R., MALME C. I. & THOMSON D. H., 1995. *Marine Mammals and Noise* (Academic Press, San Diego, California, USA).

PUSINERI C., MAGNIN V., MEYNIER L., SPITZ J., HASSANI S. & RIDOUX V., 2007: "Food and feeding ecology of the common dolphin (*Delphinus delphis*) in the oceanic northeast Atlantic and comparison with its diet in neritic areas". *Marine Mammal Science* (vol. 23, pp 30-47).

SHOM : *Instructions techniques de la campagne ERATO-09* (N° 144 SHOM/DO/MIP/DTI/NP, annexe A, 2009).

SOUTHALL B. L., BOWLES A. E., ELLISON W. T., FINNERAN J. J., GENTRY R. L., GREENE Jr. C. R., KASTAK D., KETTEN D. R., MILLER J. H., NACHTIGALL P. E., RICHARDSON J. W., THOMAS J. A. & TYACK P. L. 2007: "Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Initial Scientific Recommendations". *Aquatic Mammals* (vol. 33, pp. 411-521).