

Mesures de pollution sonore sous-marine

Rapport final
Action : A3

Merci
d'imprimer
sur du papier
recyclé
recto verso



Projet LIFE LINDA
« Limitation des Interactions Négatives entre
Dauphins et Activités humaines »
Action : A3
« Mesure de la pollution sonore sous-marine »
RAPPORT FINAL



Novembre 2005, Federica Maggiani

SOMMAIRE

1. RAPPEL DES OBJECTIFS	3
2. CARACTERISTIQUES DU SON.....	4
2.1. Les propriétés acoustiques des eaux de mer (Oceans of noise-WDCS).....	6
2.2. La propagation de bruit sous-marin (Oceans of noise-WDCS).....	7
3. SOURCES DE BRUIT MARIN (OCEANS OF NOISE-WDCS)	9
3.1. Sources de bruit naturel.....	9
3.2. Sources de bruit anthropique : « trafic nautique »	9
4. PRODUCTION SONORE ET RECEPTION AUDITIVE CHEZ LES CETACES ODONTOCETES (MAGGIANI F., TESI DI DOTTORATO 2004)	10
4.1. Système de communication: site de production des sons modulés ("sifflements")	10
4.2. Système d'écholocation : site de production des ultrasons ("clicks").....	11
4.3. Site de réception des sifflements et des "clicks"	12
4.4. Anatomie fonctionnelle de l'oreille.....	13
4.5. Élaboration de l'information acoustique.....	15
5. LE BRUIT : UN PROBLEME POUR LES CETACES	15
5.1. Observations de courte durée.....	15
5.2. Trouble et réactions du déplacement.....	16
6. METHODOLOGIE : CARACTERISTIQUES DU SUPPORT D'ENREGISTREMENT ET D'ANALYSE ACOUSTIQUE.....	17
7. CAMPAGNES D'ENREGISTREMENTS ACOUSTIQUES EN MER.....	17
7.1. Campagnes 2004.....	17
7.2. Campagne 2005	17
8. RESULTATS.....	18
8.1. Résultats 2004.....	18
8.2. Résultats 2005.....	22
9. CARACTERISTIQUES ACOUSTIQUES DES VOCALISATIONS DU GGRAND DAUPHIN ...	26
10. DISCUSSION.....	26
11. CONCLUSION	28
12. BIBLIOGRAPHIE.....	28
13. ANNEXES	30

1. Rappel des objectifs

Les gardes des Réserves Naturelles de Corse ont observé lors de sorties sur le terrain des comportements particuliers de Grands dauphins, tel que l'éclatement des groupes, au moment des fréquentations importantes par des engins à moteur. La pollution acoustique semble avoir

une influence sur le comportement des Grands dauphins. Il convient de préciser ce bruit sous-marin généré par les activités nautiques afin d'en évaluer l'impact sur les Grands dauphins. L'objectif est d'évaluer la pollution sonore dans les zones où un trafic maritime intense est observé.

Des enregistrements sous-marins sont réalisés afin d'obtenir l'évolution temporelle de l'intensité du niveau sonore ainsi que la répartition spectrale des fréquences, dans le but de les corréler avec les déplacements de Grands dauphins.

Les animaux perçoivent l'environnement à travers les systèmes sensoriels. Les mammifères marins ne font pas exception, mais pour la raison qu'ils passent la vie dans un milieu aquatique, où la visibilité est limitée, le système acoustique a pris un rôle fondamental.

Le Grand dauphin (*Tursiops truncatus*), utilise un répertoire acoustique très développé. Il s'agit des sons, utilisés par la communication (whistle) et par l'écholocation (click), de fréquences comprises entre 0,2 et 150 kHz et un niveau de puissance sonore jusqu'à 180dB (re 1 μ Pa à 1m). En particulier, les fréquences utilisées pour la communication sont comprises entre 4 et 22 kHz.

L'énergie du bruit produit par les bateaux est de l'ordre de 0,1 jusqu'à 10kHz (Buckstaff, 2004).

La pollution acoustique peut provoquer des dégâts sur les systèmes sensoriels des mammifères marins. Il faut faire, d'abord, une distinction entre les différentes sources sonores et les différents traumatismes provoqués.

La perte de la sensibilité auditive peut être de deux types : permanente (PTS) ou temporel (TTS) et peut provoquer des effets sur le comportement (stress, behavioural disruption) comme l'éloignement d'un individu par rapport au groupe; le masquage de sons (masking effects) et donc des problèmes de communications ou d'usage du système d'écholocation; des barotraumatismes peuvent endommager les organes internes (Richardson et al., 1995).

La pollution acoustique peut être de type ponctuelle, comme celle provoquée par les sonars, les explosions, ou diffuse comme dans le cas du trafic nautique.

On peut aussi avoir des effets cumulatifs pour une exposition continue et avec des sources multiples. Les effets provoqués changent en fonction de l'espèce, de l'environnement et du cycle biologique.

2. Caractéristiques du son

Le son est une perturbation élastique d'un milieu ambiant ? du à la présence d'une source vibrante. Il s'agit d'une onde de pression qui produit des zones alternatives de compression et de raréfaction des molécules du milieu qu'elle traverse, et c'est pourquoi elle peut être classifiée comme une onde mécanique. Pour se propager, elle a besoin d'un milieu comme l'air, l'eau ou la terre. Les ondes mécaniques se divisent en deux groupes:

Transversaux, les oscillations sont perpendiculaires à la direction dans laquelle se déplace l'onde.

Longitudinaux, les oscillations sont parallèles à la direction de propagation de l'onde.

Une onde acoustique ou sonore est constituée par l'alternance des ondes de compression et de raréfaction du milieu dans lequel elle se propage et qui soit perceptible par un appareil auditif animal.

Les modalités avec lesquelles un son se propage dans un milieu dépendent de facteurs tels que la densité et la compressibilité du milieu lui-même. En ce qui concerne le milieu aquatique, à n'importe quelle profondeur, il est nécessaire de considérer l'absorption (la conversion de l'énergie acoustique en chaleur et énergie chimique), la distance de la source sonore, la diffusion due aux particules en suspension et la réfraction.

La vitesse avec laquelle un son (c) se propage dans l'eau dépend de la densité du milieu, lequel dépend à son tour directement de manière proportionnelle, des valeurs de salinité, de température et de pression, (Halliday et al., 1993).

Pour un accroissement de salinité de 1% la vitesse augmente de 1,5m/sec. Pour une augmentation de 1% des valeurs thermiques, la vitesse augmente de 4m/sec Enfin, à chaque 100m de profondeur, la vitesse augmente de 1,8m/sec (Ingmanson & Wallace, 1973). En surface, où on enregistre des valeurs de température plus élevées que celles des couches sous-jacentes, la vitesse de propagation est plus grande. Plus en profondeur de la thermocline les valeurs thermiques se maintiennent presque constantes et c'est donc la pression qui détermine la vitesse des sons. La vitesse du son dans l'eau est d'environ 1500m/s, une valeur presque cinq fois plus grande que celle calculée dans l'air, 340m/s.

Chaque son est caractérisé par un ensemble de paramètres (fréquence, période, longueur d'onde), et par un ensemble de caractères comme l'intensité, la hauteur et le timbre.

La fréquence est donnée par le nombre d'oscillations dans l'unité de temps et elle est mesurée en cycles par seconde ou en hertz; elle définit la hauteur d'un son. Il est donc possible de distinguer les sons aigus et les sons graves, où les premiers possèdent une fréquence plus grande que les seconds.

La période est le temps nécessaire pour qu'une oscillation complète se déroule.

La longueur de l'onde, (la distance entre un pic et le suivant de l'onde acoustique, indiquée avec la lettre λ) est en relation avec la fréquence et représente une autre manière d'exprimer la hauteur d'un son :

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

Où c est la vitesse du son; f est la fréquence; λ est la longueur de l'onde.

L'intensité indique les variations de pression qui accompagnent une onde acoustique; c'est la puissance acoustique par unité de zone dans la direction de propagation et elle est exprimée par la formule suivante :

$$I = \frac{p^2}{\rho c}$$

Où au numérateur p est la pression, au dénominateur c est la vitesse du son, ρ la densité du milieu et leur produit est l'impédance acoustique, spécifique pour chaque milieu.

L'intensité peut être mesurée en unités absolues de pression, comme le pascal qui correspond à la pression résultante par une force d'un newton exercé sur une zone d'un mètre carré, (1N/m^2), ou en micro pascal (μPa). On préfère en général utiliser une unité empirique, nommé décibel, qui mesure le niveau sonore selon la relation:

$$\text{Niveau de Pression du Son (dB)} = 20 \log (P/P_0)$$

Où P_0 est la pression de référence, par exemple $1 \mu\text{Pa}$, et P est la pression effective.

Quand on réalise des mesures sur le niveau sonore en dB, il est toujours nécessaire de citer l'unité de référence; l'unité de mesure pour les sons sous-marins est $1 \mu\text{Pa}$ à 1 mètre de profondeur.

Un autre caractère distinctif de chaque son est le timbre; lequel se réfère aux caractéristiques des oscillations acoustiques qui le constituent, en particulier de combien d'oscillations il s'éloigne du mouvement simple harmonique. Un son qui a des oscillations qui se répètent à intervalles réguliers et qui possède une fréquence d'oscillation fondamentale, est défini pur. La plus grande partie des sons présents dans la nature ne peut pas être définie de cette manière, parce que, à la suite de la fréquence d'oscillation fondamentale, sont présentes des fréquences d'oscillations différentes, multiples entiers de la fondamentale, définies harmoniques supérieurs. C'est propre la présence de tels harmoniques qui rend chaque son caractéristique et distinguable des autres, en définissant le timbre. Pour analyser de tels sons on se sert de l'analyse de Fourier, laquelle se base sur le principe selon lequel chaque forme d'onde peut être décrite comme une somme de sinusoïdes, où le composant de majeure intensité définit la fréquence fondamentale de l'onde et sa hauteur. Les autres composants sont les harmoniques supérieurs, multiples entiers de la fréquence fondamentale. Cette analyse permet par exemple, de distinguer un son d'un bruit. En effet, dans le bruit, on ne reconnaît pas, à travers le principe de Fourier, une fréquence fondamentale qui caractérise l'onde (National Research Council, 2004).

Un modèle utile pour comprendre les phénomènes acoustiques est le principe de "source-parcours-destinataire" (Ingmanson & Wallace, 1973). En effet, chaque phénomène acoustique implique:

une source sonore avec des caractéristiques particulières;

des modifications dans les caractéristiques du son en fonction de la distance de la source;

un organisme récepteur doué de capacités auditives particulières.

La modalité de transmission est la voie par la quel le son se déplace de la source au destinataire. Les caractéristiques de la source comprennent des variations temporales, la manière avec laquelle l'énergie sonore est distribuée en fréquence ainsi que sa force. La transmission se réfère à la propagation du son à travers le milieu aquatique et il peut inclure des combinaisons différentes d'air, d'eau ou les deux ensembles. Les voies de transmission multiple se réalisent quand le son, pendant son trajet, est réfléchi par une surface, comme cela arrive avec la surface de l'eau ou avec le fond. Une surface irrégulière ou les différentes configurations du fond, provoquent la diffusion d'un signal sonore tel qu'il est absorbé au contact avec le fond. La réfraction peut être également importante dans la transmission des sons sous-marins.

Les caractéristiques du destinataire incluent, par contre, la sensibilité auditive de l'animal à un intervalle déterminé de fréquences et sa capacité de répondre à différents types et niveaux sonores. Quand on parle de capacité auditive ou intervalle auditif fonctionnel, pour une espèce donnée, on fait référence à l'intervalle de fréquences apte à provoquer une sensation auditive. Pour chaque son faisant partie de l'intervalle d'audibilité, il existe une valeur moindre d'intensité qu'il doit posséder pour être capté. On parle de sensibilité auditive propre suite à la plus basse intensité qu'un son doit posséder pour être perçu. L'intervalle d'audibilité et de sensibilité est de valeurs espèce spécifiques, déterminées au cours de l'évolution en rapport aux caractéristiques du milieu dans lequel chaque espèce s'est développée.

L'homme adulte est apte à capter des sons de fréquence variable entre 20Hz et 20.000Hz en général. Suite à l'intervalle fonctionnel d'audibilité de l'homme, les sons qui ne rentrent pas dans cette gamme, et donc ne sont pas perceptibles, se rangent en deux grandes catégories:

- ultrasons, doués de fréquences supérieures aux 20kHz;
- infrasons, doués de fréquences inférieures aux 0,02kHz.

Par une courbe audiométrique il est possible de visualiser la sensibilité auditive d'une espèce; il s'agit d'un graphique dans lequel sont représentées, sur l'axe des ordonnées, les intensités sonores, exprimées en dB (re 1 μ Pa à 1m), et, sur l'axe des abscisses, les fréquences, exprimées en kHz.

En ce qui concerne les cétacés, aujourd'hui nous avons à disposition les courbes audiométriques de 7 espèces d'Odontocètes (Au, 1993) (Annexe Illustration N.1.). Plusieurs présentent un pic de sensibilité entre 40 et 80kHz.

Il n'est pas facile de déterminer la gamme d'audibilité et l'évaluation de la sensibilité pour une espèce donnée; il est nécessaire, en effet, de recourir à des études comportementales et électrophysiologiques de réalisation et interprétation difficiles (Richardson et al., 1995).

Les cétacés sont classifiés, du point de vue des fréquences d'émission sonore, en deux groupes coïncidant avec les deux Sous-ordres des Odontocètes et des Mysticètes. Les données relatives aux fréquences d'émission trouvent confirmation dans les données audiométriques, au moins pour les Odontocètes. Ces derniers émettent de préférence des sons à haute fréquence et perçoivent des sons ayant ces caractéristiques; les Mysticètes utilisent, par contre, des sons à basse fréquence pour communiquer sur de grandes distances (Reynolds III & Rimmel, 1999).

2.1. Les propriétés acoustiques des eaux de mer (Oceans of noise-WDCS)

Les longueurs d'onde de l'énergie acoustique s'échelonnent dans l'océan entre 50m et 1mm. Si l'on considère la vitesse de propagation du son dans l'eau de mer comme approximativement 1500 m/s cela conduit à des fréquences de 30 Hz à 1,5 Mhz (1 méga Hertz = 10^6 Hz).

L'eau transporte les sons plus rapidement que l'air, en outre les caractéristiques de stratification de l'eau, lié principalement à la salinité, à la température et aux courants, ils créent canaux de propagation qu'ils mènent les sons, le long des vrais "guides de flot", avec basses dispersions, pour dizaines et parfois centaines de kilomètres.

La vitesse du son augmente avec la température d'environ 4,5 m/s pour degré, avec la salinité d'environ 1,3 m/s pour chaque millième de variation de la salinité et avec la profondeur d'environ 1,70 m/s chaque 100m. En absence de phénomènes d'absorption, réflexion et dispersion, l'intensité du son décroît proportionnellement au carré de la distance de la source.

2.2. La propagation de bruit sous-marin (Oceans of noise -WDCS)

Quand on décrit la propagation de bruit sous-marin est utile à appliquer un modèle simple, qui est basé sur l'équation du sonar et peut-être la plus simple de ceux-ci est la Source-Milieu-Receveur. Les paramètres de base de ce modèle sont :

- (1) **source**: la source de perturbation, par exemple un bateau, un sonar, etc.. Paramètre d'intérêt = niveau de la source (SL Source Level)
- (2) **milieu**: la colonne d'eau. Les paramètres d'intérêt incluent la perte de transmission (TL Transmission Loss), et le niveau de bruit ambiant (NL Ambient Noise Level))
- (3) **receveur**: par exemple baleine, hydrophone, etc.. Les Paramètres d'intérêt incluent le signal "to noise ratio" (SNR), le niveau de l'intensité des sons reçu (RL Received Sound Intensity Level)) et le seuil de la détection (DT Detection Threshold).

Un modèle simple de propagation du son est:

$$RL = SL - TL$$

Où RL est le niveau de réception, SL est le niveau de la source et TL est la perte de transmission.

La Perte de transmission (TL)

La perte de transmission est la diminution d'intensité d'un son quand se propage à travers un milieu, et c'est le résultat de diffusion, absorption, dispersion, réflexion et raréfaction. La perte de transmission peut être aussi estimée en ajoutant les effets de propagation géométrique (TLsp Transmission Loss for Geometrical Spreading), absorption (Tla Transmission Loss for Absorption) et la perte de transmission pour anomalie (A Transmission Loss Anomaly). L'anomalie de la perte de transmission inclut perte de diffusion et pertes dû à réflexion et raréfaction limites des interfaces.

$$TL = TL_{spreading} + Tl_{absorption} + A$$

TLsp – Spreading Loss

"Spreading Loss" est le majeur composant de perte de transmission et est gamme (distance) dépendant. Deux types sont communs sous la mer (1) Sphérique ou Géométrique perte de transmission (Tlg), et (2) perte de transmission Cylindrique (Tlcy).

Perte de transmission sphérique ou géométrique (Tlg):

Ce type de perte est typique d'un environnement constant ou homogène comme celui des eaux profondes (>2000m). Un Son qui part d'une source se propagera sous forme d'ondes sphériques, et l'intensité varie inversement avec le carré de la distance de la source:

$$Tlg = 20 \log (R/R_0)$$

$$R < R_1$$

Où R est la gamme en mètres du receveur de la source et R₀ est une gamme de référence, habituellement 1m.

Avec la transmission sphérique, les niveaux sonores diminuent par 6dB si la distance est doublée et par 20dB quand il y a l'augmentation de la distance par un facteur de 10.

R₁ est la gamme en mètres à la quelle la transmission sphérique s'arrête et la transmission cylindrique commence.

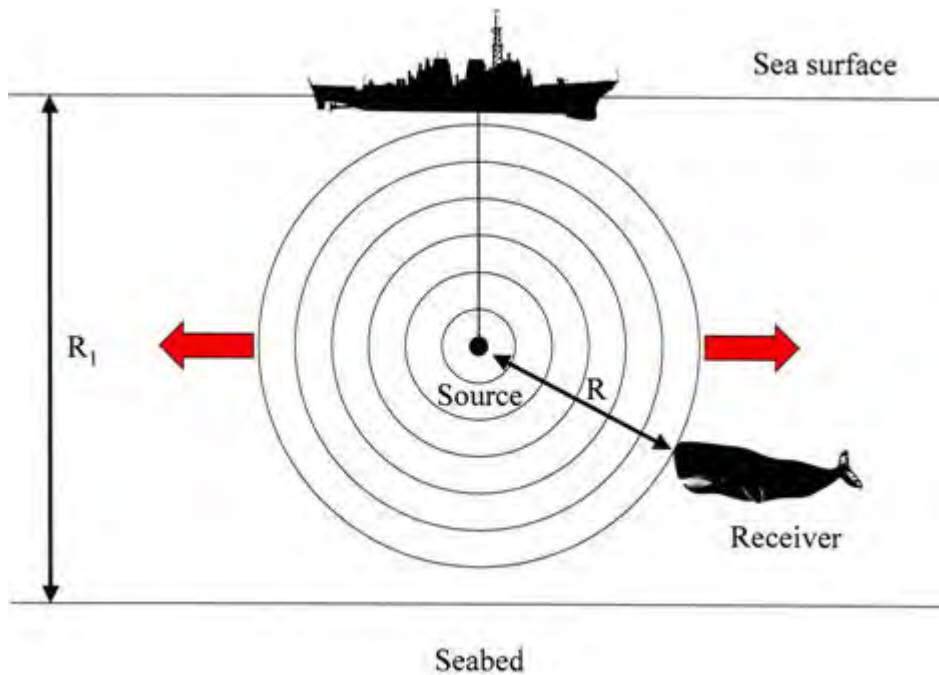


Illustration N. 2. Spherical spreading ($R_1 > R$).

Perte de transmission cylindrique:

La transmission cylindrique est typique des milieux non-homogènes. Milieux non-homogènes sont typiques d'eaux côtières stratifiées ou peu profondes ($< 200\text{m}$), où le son est réfléchi ou réfracté de la surface et du fond de la mer ou par différentes couches de la densité d'après la Loi de Snell.

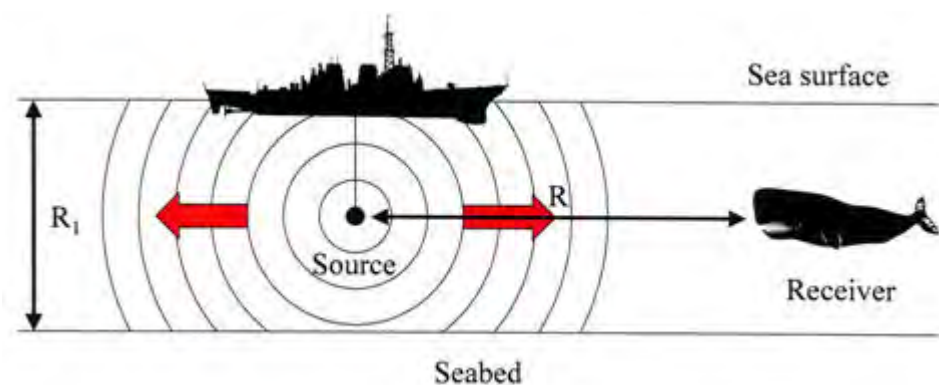
À une distance donnée de la source qui est long par rapport à la profondeur de l'eau plusieurs ondes réfléchies combinent de manière constructive pour former un front de la vague cylindrique.

Où il y a la transmission cylindrique, l'intensité du son varie inversement avec la distance de la source:

$$TL_{cy} = 20 \log R_1 + 10 \log (R/R_0) \quad R > R_1$$

La transmission cylindrique est applicable où la gamme du receveur de la source est plus grande que la profondeur de la colonne d'eau ou couche de la densité, ($R > R_1$). Où R_1 est la gamme en mètres à la quelle la transmission sphérique s'arrête et la transmission cylindrique commence. Pour gammes $R < R_1$, TL est sphérique. La perte pour la transmission cylindrique ($R > R_1$) est moins que pour la transmission sphérique ($R < R_1$), et l'intensité du son décroît par 3dB si la distance c'est doubles et par 10dB quand il y a l'augmentation de la distance par un facteur de 10. Par conséquent, une source sonore produit dans les eaux côtières peu profondes voyages deux fois la distance d'une source sonore égale dans l'océan ouvert.

Illustration N.3. Cylindrical spreading ($R_1 < R$).



3. Sources de Bruit Marin (Oceans of noise-WDCS)

3.1. Sources de bruit naturel

Les niveaux du bruit ambiant ou bruit de fond sont le produit de beaucoup de sources de perturbation océaniques, y compris sources artificielles naturelles et distantes (Tableau N.1). Le bruit de sources naturelles est produit par des processus physiques ou biologiques. Exemples de processus physiques générateur de bruit sont : activité tectonique (sismique) dans la croûte terrestre (volcans et tremblements de terre), vent et vagues, pendant que les exemples de sources de perturbation biologiques sont les vocalisations de mammifères marins et de poissons.

Ambient noise sources	Source levels, dB re 1 µPa-m							Highest level					
	Broad-band	1/3 rd octave band centre frequencies (kHz)						1/3 rd band	octave band				
	(0.045-7.07 kHz)	0.05	0.1	0.2	0.5	1	2	Freq.	Level	Strong infrasonics?	Freq. Range (Hz)	Do m. Fre q. (Hz)	Source level (dB re 1 µPa-m)
Wind and waves	-	-	-	-	-	-	-	-	-		1->30,000	-	
Volcanoes & earthquakes	-	-	-	-	-	-	-	-	-		2-500	-	
Rain	-	-	-	-	-	-	-	-	-		100-500	-	
Biological noise (shrimps, cetaceans, etc.)	-	-	-	-	-	-	-	-	-		1->100,000	-	
Sea ice noise											0.5-8,000	-	

Tableau N.1. Sources de bruit naturel.

3.2. Sources de bruit anthropique : « trafic nautique »

Le bruit de bateaux domine les eaux marines, avec l'usage croissant de sonar et sondeurs de la profondeur. La plupart de bateaux e navires produisent une gamme de la fréquence basse, moins que 1kHz (Tableau N.2) cela coïncide avec les fréquences utilisées, en particulier, par les baleines pour la communication et autres activités biologiquement importantes. En général, les vieux bateaux produisent plus de bruit que les nouveaux et les plus grands vaisseaux produisent plus que les plus petits.

En général, il faut additionner le bruit produit par les bateaux avec le bruit présent normalement dans un milieu naturel.

Il y a eu ces dernières années une grande augmentation du bruit ambiant, en particulier dans l'Hémisphère du Nord et cela a des implications pour les cétacés. Par exemple, les baleines bleues (*Baleanoptera musculus*) varient le niveau de l'intensité de sons produits en réponse aux niveaux de bruit ambiant variables.

Bien que, typiquement, les navires produisent des fréquences au-dessous de 1 kHz, les petits bateaux produisent des sons de 1 kHz, jusqu'à 50 kHz lesquels ont la possibilité d'avoir un impact sur les Odontocètes. Les hélices ont tendance à causer des creux qui produisent plus hautes fréquences de bruit, et ces plus hautes fréquences pourraient déranger les plus petits cétacés qui paraîtraient être plus sensible à son de l'onde décimétrique. Evans *et al.* (1992) étudient les effets de bateaux de plaisance sur les grands dauphins et démontre que les cétacés sont dérangés par le trafic nautique en effet des comme des changements des temps de plongée et la fuite quand les bateaux se rapprochent à une distance de 150 - 300m sont observables. Les bateaux plus rapides ont causé plus de trouble que plus grands bateaux plus lents, comme le bruit émis par les bateaux de vitesse reste au-dessus du bruit du fond seulement un temps court avant rentrer en contact en provoquant une réaction très importante

Type of vessel	Frequency (kHz)	Source level (dB re 1µPa)	Reference
650cc Jetski	0.8-50.0	75-125	Evans and Nice 1996
Rigid inflatable	6.3	152	Malme <i>et al.</i> 1989
7m outboard motor boat	0.63	156	Malme <i>et al.</i> 1989
Fishing boat	0.25-1.0	151	Greene 1985
Fishing trawler	0.1	158	Malme <i>et al.</i> 1989
Tug pulling empty barge	0.037	166	Buck and Chalfant 1972;
	1.0	164	Miles <i>et al.</i> 1989
	5.0	145	
Tug pulling loaded barge	1.0	170	Miles <i>et al.</i> 1989
	5.0	161	
34m (twin diesel engine) workboat	0.63	159	Malme <i>et al.</i> 1989
Tanker (135m)	0.43	169	Buck and Chalfant 1972;
Tanker (179m)	0.06	180	Ross 1976;
Supertanker (266m)	0.008	187	Thiele and Ødengard 1983
Supertanker (340m)	0.007	190	
Supertanker (337m)	0.007	185	
Containership (219m)	0.033	181	Buck and Chalfant 1972;
Containership (274m)	0.008	181	Ross 1976;
Freighter (135m)	0.041	172	Thiele and Ødengard 1983

Tableau N.2. Résumé de fréquences produites par les bateaux et leurs niveaux de la source.

4. Production sonore et réception auditive chez les Cétacés Odontocètes (Maggiani F., Tesi di Dottorato 2004)

De nombreuses études ont essayé de mettre en relation l'existence de certains sons avec des comportements spécifiques, mais la fonction reste encore assez inconnue.

Chez les Odontocètes on fait une distinction entre deux catégories principales de sons :

- les sifflements: vocalisations utilisées pour la communication;
- les "clicks": utilisés par le système biosonar, sont des impulsions sonores.

4.1. Système de communication: site de production des sons modulés ("sifflements")

Chez les Odontocètes le larynx est le site de production des sifflements. La différence la plus évidente entre les mammifères terrestres et marins est que ces derniers ne possèdent pas les cordes vocales et les plis laryngales. Protégé par des cartilages, le larynx est connecté avec les extrémités des cavités nasales et possède des muscles propres. Les sons sont générés par la mise en vibration des structures cartilagineuses rigides.

Les cétacés, contrairement aux mammifères terrestres, n'introduisent pas d'air dans l'« arbre respiratoire », et le mouvement de l'air doit se dérouler entre les parties connectées des voies aériennes. Les cétacés qui font partie de la famille Delphinidae, et en particulier l'espèce *Tursiops truncatus*, ont une organisation très particulière et complexe avec un squelette de cartilages, d'articulations et de ligaments pour l'implantation des muscles; à l'intérieur il y a une « tonaque mucus ».

Les différences acoustiques caractéristiques des sifflements, sont produites par la modification de l'ouverture laryngale à travers laquelle passe l'air. En effet il s'agit d'un mécanisme comparable à la modification produite par le changement de la position des lèvres quand on siffle.

La cavité orale ne prend pas part au mécanisme d'émission sonore parce qu'elle est isolée du trait respiratoire par le sphincter naseau-pharyngial, c'est pour cette raison que les cétacés ne respirent pas avec la bouche.

Cette séparation fonctionnelle permet aux sons de rejoindre l'environnement à travers les cavités nasales plutôt qu'à travers la cavité orale.

4.2. Système d'écholocation : site de production des ultrasons ("clicks")

La production des "clicks" est à la base du fonctionnement du système "biosonar" ou d'écholocation dont les cétacés Odontocètes sont pourvus. Il s'agit de sons impulsifs à la haute fréquence: chez le Grand dauphin l'intervalle d'émission est compris entre 0,2 et 150kHz avec un niveau de pression sonore compris entre 218 et 228dB, (re 1 μ Pa à 1m), (Au, 1993). Leur durée oscille de 10 à 100msec et cela permet qu'ils soient envoyés sous forme de décharges impulsives, au nombre de 10 ou 100 par seconde. Les "clicks" sont produits au niveau du système complexe des sacs nasaux localisés le long des voies respiratoires adjacentes aux narines (Norris, 1969). Ces sons sont adressés à l'extérieur sous forme d'un faisceau sonore directionnel; ceci est possible grâce à l'existence d'un organe, de nature graisseuse, positionné dans le front de l'animal et nommé melon (Annexe Illustration N.2). Le faisceau sonore est utilisé continuellement pour sonder le milieu environnant, d'une manière analogue à tout ce que nous faisons par la vue, et ceci permet au dauphin d'avoir une "vision" complète et claire du monde dans lequel il vit.

Quand l'animal détermine une cible, animée ou inanimée, qu'il suscite son intérêt, il adresse le faisceau d'ultrasons dans cette direction; le rayon rencontre l'objet, puis est réfléchi par ce dernier, en revenant sous forme d'écho à l'animal. Les ondes sonores de retour sont captées par des structures spéciales du crâne de l'Odontocète, envoyées jusqu'à l'oreille, puis sous forme de signaux bioélectriques au cerveau.

Beaucoup d'espèces d'Odontocètes ont été étudiées et analysées, après échouage, à travers la Tomographie Axiale Informatisée (SCANOGRAPHIE), aux Rayons X, ou avec des méthodes de Résonance Magnétique de l'image (MR), (Cranford et al., 1996).

La partie du corps qu'on suppose être le site de production des "clicks" se trouve dans les voies supérieures aériennes de l'animal, c'est-à-dire entre les narines et le pharynx. Ce système, nommé "MLDB complex", ("monkey lips dorsal bursae complex"), comprend une petite paire de "bursae" de tissu adipeux inclus dans une paire de crêtes de tissu connectif ("monkey lips"), le ligament des narines, les sacs nasaux et le bouchon nasal ("nasal plug") (Annexe Illustration N.3).

Amundin en 1983, à travers l'analyse du mécanisme de production du son sur deux espèces différentes d'Odontocètes : *Tursiops truncatus* et *Phocoena phocoena* a postulé que la production sonore est à attribuer à une augmentation considérable de la pression dans les cavités nasales. Comme pour le marsouin et le Grand dauphin, chez tous les autres Odontocètes, existent des structures homologues aptes à la production des sons de l'écholocation.

Tous les Odontocètes, sauf le *Physeter catodon* possèdent une paire de "monkey lips" associées aux deux côtés de l'os nasal des voies supérieures aériennes, (Cranford et al., 1996). Les lèvres, une inférieure et une supérieure sont formées par des crêtes de tissu connectif qui semblent être le point central du site de production des ultrasons.

Cranford a décrit les "bursae" comme quatre petits corps gras, situés dans la tête du dauphin, insérés à l'intérieur de la cavité spiraculaire, postérieurement au melon. Chaque bursae forme, avec la paire correspondante de "monkey lips", une unité intégrée qui est contenue à l'intérieur de la lèvre, ce qui donne le nom au complexe entier ("MLDB complex").

Le ligament des narines rentre dans les annexes qui soutiennent le "MLDB complex." Cet ensemble de fibres musculaires permet de soutenir et de modifier la forme du complexe entier. Même s'il n'a pas une connexion véritable avec les narines, il est le responsable fondamental de la fermeture du canal aérien principal, (Cranford et al., 1996).

Les sacs nasaux ont probablement un rôle important dans le processus d'écholocation. Leur nombre, dimension et forme changent selon l'espèce considérée, cependant en général ils ne changent pas de position. Dans la famille des Delphinidés, les sacs nasaux ont un rôle important dans l'accumulation d'air dans les voies supérieures aériennes, (Cranford et al., 1996).

Les bouchons nasaux sont des masses flexibles de tissu connectif et musculaire, qui ferment la partie inférieure des voies supérieures aériennes, avec un mécanisme qui provoque l'augmentation de la pression dans la cavité de l'os nasal, mécanisme impliqué dans la production des "clicks", (Amundin & Andersen, 1983).

Malgré le fait que le mécanisme n'a pas encore été complètement clarifié, le modèle proposé par Amundin et Andersen est le plus reconnu. En ayant pris des mesures de pression à

l'intérieur de la cavité nasale pendant la vocalisation de *Phocoena phocoena* et *Tursiops truncatus*, ces auteurs ont vu que la pression augmentait considérablement pendant la production des "clicks" et qu'elle diminuait quand ils cessaient. Le mécanisme proposé a pour origine les variations de pression, et fonctionne grâce aux composants anatomiques précédemment décrits.

Quand un dauphin inspire en surface, ses narines s'ouvrent et une quantité considérable d'air envahit les voies aériennes de l'animal. Pendant l'immersion les poumons clapsent, les alvéoles tendent à se vider et à libérer la quantité d'air qu'ils contiennent. Une partie de l'air relâchée par les alvéoles est poussée par les muscles du naseau pharyngal dans les parties supérieures des voies aériennes, envahit les cavités supérieures osseuses, entre pharynx et narines, en remplissant aussi les sacs nasaux. L'air qui arrive dans les cavités est riche en vapeur d'eau qui se dépose sous forme de petits bulles à la surface des "monkey lips": à ce niveau le système des "nasal plug" intervient et, à travers son composant musculaire, porte en traction une lame connective en provoquant la fermeture de la partie supérieure du canal nasal et, ensuite, l'isolement des structures contenues entre "nasal plug" et narines. À cause de l'augmentation de pression du système entier, les muscles qui entourent les sacs nasaux se contractent, l'air pressurisé sort des sacs et provoque un changement de pression du système "MLDB complex." De cette manière, les bulles de vapeur d'eau, qui y étaient déposées, implosent du fait de la pression élevée à laquelle elles sont soumises, en engendrant l'onde acoustique du "click", (Cranford et al., 1996).

Le melon est l'organe qui focalise et adresse les ondes sonores émises par le "biosonar", (Annexe Illustration N.4). Il a la capacité de focaliser un train de "clicks" sur un objet qui attire l'attention de l'animal, grâce aussi à la présence en sa partie basale de composants musculaires qui permettent des petites variations de forme. À la dissection il apparaît de forme approximativement conique, sa couleur est jaunâtre indiquant une composition prédominante de matière grasse.

Litchfield a supposé que les propriétés acoustiques du melon doivent être attribuées aux tissus dont il est composé.

La vitesse de conduite sonore des tissus du melon a été mesurée avec un "Sing-Around Velocimeter", réglé à 4MHz, à travers lequel a été estimé pour les triglycérides une vitesse égale à 1383m/s, (Varanasi et al., 1975). Le melon du dauphin *Tursiops truncatus* présente une partie centrale, nommée "core", dans laquelle la vitesse de propagation du son est égale à un intervalle de 1273-1376m/s, entourée par une partie à la plus haute densité, qui présente une vitesse ultrasonique supérieure, de 1682m/s, (Varanasi et al., 1975).

4.3. Site de réception des sifflements et des "clicks"

La capacité, des Odontocètes, d'émettre des sifflements et des "clicks" a poussé à savoir comment de tels signaux, porteurs de renseignements si différents, pouvaient être captés par l'animal.

Selon les connaissances actuelles, on pense que les sons rejoignent la cochlée selon deux mécanismes de conduite complètement distincts :

La structure creuse de la mandibule et le membre de graisses "acoustiques" à l'intérieur, semblent être idéaux pour la transmission des sons à la haute fréquence. L'écho de retour du faisceau sonore, sous forme d'ondes acoustiques, à travers l'oreille externe, comme chez la plus grande partie des animaux, pour les sons situés dans la gamme de l'audible, c'est-à-dire les sifflements; par la mandibule pour les "click" qui voyagent à travers l'eau en provoquant des vibrations dans la région apicale de la mandibule inférieure du dauphin, qui fonctionne comme une antenne réceptrice. Goodson remarqua que la disposition des dents est alternée dans les deux semi arcades de la mandibule. Cette disposition dentaire spéciale et le fait que les dents chez les cétacés Odontocètes ne sont pas structurales, n'étant pas insérées à l'intérieur de l'os mandibulaire pour des fonctions masticatrices, il a émis l'hypothèse que l'on se trouve face à un système de résonance apte à favoriser la propagation des renseignements de l'apogée de la mandibule jusqu'à l'os temporal, à travers un canal préférentiel constitué de matériel lipidique, (Goodson & Klinowska, 1990).

En revanche le parcours effectué par les sons utilisés par les Odontocètes dans la communication sifflements sont perçus directement par l'oreille externe et puis transmise à l'oreille moyenne et interne. De la même façon que pour les autres mammifères terrestres.

Cette double capacité fonctionnelle permet à l'animal d'utiliser les deux systèmes, écholocation et communication, en même temps et sans qu'il y ait interférence de réception.

La mandibule est creuse et contient à l'intérieur des tissus gras, qui ont été analysés avec des méthodes de chromatographie à travers l'usage de gaz liquides, (GLC), (Ackman et al., 1973).

De la mandibule, les ondes acoustiques sont conduites à l'oreille de l'animal ce qui permet de transformer le « langage » sonore de l'écholocation contenant des renseignements concernant le milieu environnant, en décharges de potentiel d'action, c'est-à-dire le « langage » du système nerveux central.

Le seuil d'audibilité des cétacés change légèrement en fonction de l'espèce considérée; le *Tursiops truncatus* a une gamme de 0.2 à 15kHz, en devenant moins sensible sous les 32kHz et au-dessus des 123kHz, (Annexe Illustration N.1).

4.4. Anatomie fonctionnelle de l'oreille

Oreille externe

L'oreille externe a au départ une petite ouverture, couverte par un bouchon fibreux, lequel, chez l'espèce *Tursiops truncatus* présente une forme ovale et est difficilement visible, du fait de ses faibles dimensions, 0,5mm par 2mm.

Il n'y a aucun pavillon auriculaire, car ceci entraînerait des limitations à l'hydrodynamisme corporelle. La conduite auditive est un canal étroit et long, d'environ 7,5cm chez le *Tursiops truncatus*. Cette conduite est caractérisée par :-

- une région initiale membraneuse dont le canal est fermé par du mucus et des substances cireuses.

- une région cartilagineuse qui représente les 2/3 environ de la conduite où le canal est ouvert., (McCormick et al, 1970). Le méat se termine avec une partie expansée, ce cône, se rapportent à la marge d'une ouverture positionnée sur la surface dorsale de l'os tympanique et fermés par la membrane tympanique, homologue au niveau fonctionnel à celle présente dans l'oreille des autres mammifères. En réalité chez les Odontocètes le méat auditif est presque tout à fait occlus et ne présente pas de connexion directe avec la membrane tympanique à partir duquel débute l'oreille moyenne. Ceci laisse supposer que cette partie du système auditif offre une fonction limitée ou résiduelle. Si cette hypothèse était confirmée, la transmission sonore jusqu'à la l'oreille moyenne se réaliserait, pour les sons de n'importe quelle fréquence, par les tissus mous présents dans les régions spécialisées de la tête de ces mammifères. Ceci a été en partie confirmé pour les ultrasons, impliqués dans le processus d'écholocation.

En outre, l'organisation morphologique de l'oreille externe, elle présente une forme d'adaptation au milieu marin parce qu'elle a la fonction de protéger les structures auditives d'une stimulation excessive.

Oreille moyenne

Chez les cétacés l'oreille moyenne comme l'oreille interne est logées dans une sorte de coque osseuse, le complexe « tympan-periotique ». Un tel complexe est constitué par l'ensemble d'une bulle tympanique osseuse, contenant l'oreille moyenne et un bulle periotique également de nature osseuse, contenant l'oreille interne. Le complexe bullaire décrit précédemment est situé dans une grande cavité peribullaire, à l'extérieur de l'os temporal. De plus, chez les cétacés, contrairement à tout ce qui arrive chez les mammifères terriens, les structures destinées à la réception auditive sont disposées à l'extérieur de la boîte crânienne et sur l'os temporal, (McCormick et al., 1970; Ketten, 1997). Chez les Odontocètes, les complexes « tympan-periotiques » sont suspendus dans une muqueuse, le plexus peribullaire, par cinq cloisons de ligaments ou plus afin d'isoler l'oreille de la transmission sonore osseuse et de protéger cette structure de la stimulation excessive due à la multiplicité des sons présents en milieu marin. L'oreille moyenne est une cavité remplie d'air dans laquelle trouvent place trois os de petites dimensions: marteau, enclume et étrier. Les trompes d'Eustaches sont robustes et amples, de manière à éviter l'occlusion ainsi que les risques liés aux barotraumatismes au cours des plongées (Ketten 1997).

Le premier des osselets cités, le marteau n'est pas en contact direct avec la membrane tympanique: la connexion arrive grâce au ligament tympanique qui s'accroche sur un pont osseux du marteau; et au ligament postérieur. Dans la partie antérolatérale du marteau s'accroche le muscle tenseur du tympan qui règle l'état de détente de la membrane homonyme.

Au marteau est associée l'enclume par un ligament qui provoque presque la fusion totale entre les deux éléments osseux. L'enclume est en communication, par ce ligament, avec l'étrier qui est complètement mobile grâce à la présence d'un ligament qui réalise un contact indirect avec la fenêtre ovale, où commence l'oreille interne. La fonction des trois osselets, chez les cétacés, et en particulier chez les Odontocètes, est d'atténuer, et non d'amplifier comme cela arrive chez la plus grande partie des mammifères terriens, les sons trop intenses qui atteignent l'oreille.

Oreille interne

L'os « periotique » loge le labyrinthe membraneux de l'oreille interne qui est subdivisée en un composant vestibulaire et l'autre auditif.

Le système vestibulaire est composé, comme chez tous les mammifères, par trois canaux semi-circulaires orientés selon les trois directions de l'espace; les dimensions de ces canaux sont considérablement réduites face à celles du canal cochléaire et l'innervation est insuffisante. Cette dernière considération a fait naître le problème relatif à la fonction du système vestibulaire: on croit qu'en beaucoup de cas ce soit simplement une structure résiduelle, reste de l'ancienne dérivation des mammifères terriens.

Le composant auditif est constitué en revanche par un organe de réception localisé dans une structure appelée cochlée : spirale membraneuse contenue dans une spirale osseuse (Annexe Illustration N.5). La cochlée est connectée au crâne par des tissus connectifs et des cartilages, et elle est entourée d'une "graisse acoustique" semblable à celle trouvée à l'intérieur du melon et de la mandibule. À l'intérieur il y a deux membranes qui le traversent longitudinalement: la membrane basilaire et la vestibulaire. La présence de ces membranes subdivise la cochlée en trois canaux parallèles remplis de liquide : l'escalier moyen ou cochléaire, l'escalier tympanique et l'escalier vestibulaire. L'escalier vestibulaire prend naissance à la fenêtre ovale; l'escalier tympanique naît à partir de la fenêtre ronde; et l'escalier moyen, lequel contient l'organe du « Corti » ou organe sensoriel auditif, est un sac aveugle compris parmi eux, (Ketten, 1997).

La capacité de capter des stimulations de nature acoustique est vraiment liée à la présence de l'organe du « Corti », lequel trouve appui sur la membrane fondamentale. Il s'agit d'un ensemble complexe de cellules sensorielles, organisées sur des lignes différentes et étendues par la base jusqu'au bord supérieur de la cochlée. Au-delà des récepteurs sensoriels véritables, il y a d'autres typologies cellulaires avec des fonctions de soutien. La densité des cellules ciliaires par millimètre de cochlée et le nombre de cellules ganglionnaires est élevée chez les cétacés, si on les compare avec celle de l'homme. Les cellules ciliaires sont stimulées par des oscillations de la membrane fondamentale. L'escalier moyen est rempli d'un fluide nommé endolymphe et les déplacements des cils se réalisent comme des oscillations alternatives vers l'intérieur et vers l'extérieur de l'axe cochléaire. De tels mouvements déterminent l'ouverture ou la fermeture de canaux ioniens mecano dépendants, situés sur la surface des cellules mêmes comportant des variations du potentiel de membrane appelées potentiels cochléaires. Ce potentiel, au niveau du pôle synaptique des cellules ciliaires détermine les variations du relâchement de neurotransmetteur ce qui assure la transduction mecano électrique de la stimulation acoustique. Les fibres afférentes portent les renseignements aux centres encéphaliques supérieurs sous forme de potentiels bioélectriques : les potentiels d'action.

Pour que ces événements complexes mentionnés puissent se réaliser, il est nécessaire que la membrane fondamentale, suite de l'arrivée d'une stimulation sonore, entre en oscillation. Cette structure est constituée par un ensemble de fibres conjonctives élastiques, dont la longueur et la largeur changent lors du passage à l'intérieur de la cochlée; ceci implique une sensibilité variable des différentes parties de la membrane aux sons de fréquences différentes. Ces modalités de fonctionnement permettent de définir cette structure comme un système de résonance tonotopique. L'arrivée d'une stimulation acoustique détermine l'apparition, dans la membrane, d'une onde d'oscillation qui la parcourt sur toute sa longueur et dont les caractéristiques changent pendant sa propagation. L'ampleur de l'oscillation atteint un maximum pour décroître ensuite. Le point de meilleure oscillation change en relation à la fréquence du son. Les changements en longueur et épaisseur de la membrane fondamentale changent en fonction de la gamme de sensibilité auditive de l'animal et à sa dimension corporelle. En particulier, tout la longueur de la membrane de la cochlée, augmente en fonction des dimensions du cétacé: par exemple chez le *Tursiops truncatus* la membrane est longue 38.9mm, contre les 33mm de l'homme, alors que chez les Mysticètes elle peut atteindre la longueur de 64.7mm. Variations en largeur et épaisseur dépendent, en revanche, de la sensibilité auditive de l'animal (Ketten 1997).

Les sons de hautes fréquences sont décodées par la partie basale de la spirale cochléaire où la membrane, chez la plus grande partie des Odontocètes, est ample environ 30µm, et épaisse, environ 25µm. En ce qui concerne les dimensions de la membrane fondamentale à l'apogée de la spirale cochléaire, ont été relevées, pour les Odontocètes, des valeurs moyennes de 300-500µm pour l'ampleur, (valeur correspondante à environ 1/3 de celui calculé pour l'homme) et 5µm pour la largeur.

L'évaluation du rapport entre les fibres afférentes ganglionnaires et les cellules ciliaires, est importante chez les Odontocètes et en particulier dans l'espèce *Tursiops truncatus*, un

phénomène évident de convergence, c'est-à-dire que plusieurs fibres afférentes terminent sur la même cellule sensorielle, confirmation des hypothèses mentionnant l'existence de voies acoustiques nerveuses plus complexes et articulées que chez l'homme.

4.5. Élaboration de l'information acoustique

Les dimensions de l'encéphale changent considérablement à l'intérieur de l'ordre des Cétacés; les analyses comparatives entre dimensions corporelles et cérébrales ont montré l'existence d'un processus d'encéphalisation: les espèces de plus petites dimensions, appartenant au Sous-Ordre des Odontocètes possèdent un cerveau plus grand, en proportion, par rapport aux membres du Sous-ordre des Mysticètes. En ce qui concerne forme, proportions et caractéristiques générales des différentes régions encéphaliques, il n'y a pas de différences particulières entre les deux groupes.

La réponse du système central nerveux aux stimulations auditives comme les sons émis par le système "biosonar" est difficile à rechercher. Pendant plusieurs années, différentes méthodologies ont été expérimentées; la plus intéressante est sûrement celle proposée par Ridgway et ses collaborateurs, (Ridgway et al. 1980), laquelle prend le nom d'ABR, Auditory Brainstem Response. Ils expérimentèrent la technique sur deux espèces de dauphins en milieu artificiel, le *Tursiops truncatus* et le *Delphinus delphis*, à travers l'installation d'électrodes dans le mésencéphale de l'animal. La réponse évoquée par un train de clicks était de sept ondes durant une période de 10 millisecondes. Ils conclurent que le cerveau des deux animaux, étaient particulièrement aptes à la réception de stimulations auditives sous forme de brefs et fréquents "clicks", qui évoquent un nombre déterminé de potentiels comme réponse à la stimulation.

L'examen anatomique détaillé d'un cerveau de dauphin montre que l'écorce, siège principal de l'élaboration des stimulations extérieures sensorielles, et donc aussi auditives, a une particularité: au-delà des lobe limbique et surlimbique, il existe un troisième lobe, le paralimbique, (Morgane et al., 1985), (Annexe Illustration N.6). La présence d'une subdivision en trois parties de l'écorce sensorielle pourrait signifier que, comme l'évolution dans le milieu marin a apporté des modifications considérables dans la physiologie de ces animaux, comme la présence d'un système "biosonar" remédiant à une visibilité non optimale dans l'eau, et également au niveau du système central nerveux où semblerait exister un site particulier d'élaboration de ces signaux complexes. Les renseignements associés aux ondes acoustiques qui reviennent à l'animal peuvent concerner, par exemple, la présence d'un banc de poissons, leur distance, leur nombre, l'état de leur vessie natatoire, leur distance de la surface ou la présence d'œufs. Il s'agit de renseignements d'une complexité considérable on suppose donc que la présence du lobe paralimbique, absent chez les autres mammifères, offre des fonctions spécifiques dans l'élaboration des ondes acoustiques.

5. Le Bruit : un problème pour les cétacés

5.1. Observations de courte durée

Il ne peut pas être supposé qu'aucunes conséquences biologiques ne résultent d'exposition aux forts bruits quand aucune réponse relative du comportement n'est mesurée. Cependant, quant à déterminer si un bruit est considérable, la prise en compte de réponses relatives du comportement peut fournir de l'information utile. L'identification des réponses relatives au comportement exige que le comportement « normal » d'un cétacé (dans les circonstances particulières sous lesquelles ils sont exposés au bruit) soit bien catégorisé et les changements doivent être mesurables et lié aux impacts provoqués par le bruit. Les chercheurs doivent, aussi, être capables de détecter les changements de comportement, ce qui est particulièrement difficile, avec des animaux qui passent beaucoup de leur temps immergés.

5.2. Trouble et réactions du déplacement

La littérature nous informe qu'un bruit anthropique peut induire des réactions de courte durée relative au comportement incluant un arrêt de l'alimentation, de la socialisation des vocalisations, des changements dans le comportement de plongée ainsi que des comportements d'évitement ou d'attraction. De plus, le bruit peut induire selon la littérature le déplacement de cétacés de leurs habitats préférentiels. Si ces bruits sont de courte durée ils n'entraînent aucun dérangements ou des perturbations insignifiantes. Cependant, si ces perturbations sont répétées ou sont de longue durée, elles peuvent être à l'origine de stress, d'affaiblissement et parfois même la mort.

Se rapprocher, aussi bien que s'éloigner de la source de perturbation, devrait être considéré comme une perturbation de l'animal celui ayant changé son comportement naturel.

Le déplacement des animaux hors de leurs habitats préférentiels pourrait avoir des effets profonds. Troubles et déplacements causés par le trafic nautique peuvent avoir un impact négatif considérable et peut-être plus particulièrement pour les populations côtières. Ces animaux sont soumis à une variété de facteurs anthropiques qui rendent leur existence difficile. La perte d'habitats importants (par exemple les zones de nourrissage) pourrait détériorer l'état de ces populations, en augmentant la mortalité.

Il y a une vaste collection de preuves de réactions des cétacés dus à la circulation de bateaux.

Effroi, éloignement et changements dans le comportement social et le comportement vocal, ont été observé chez les Mysticètes et Odontocètes d'une dizaine à une centaine de kilomètres (Gordon et al. 1998).

Il devrait être noté que même lorsqu'il n'y a aucune réponse mesurable en terme de comportement nous ne pouvons pas supposer qu'aucunes conséquences biologiques ne résultent de leur exposition aux bruits.

Différents impacts possibles du bruit sur les cétacés (d'après Simmonds et Dolman, 1999) :

Physique

Non Auditif

Dégât du corps
Induction des " bends"

Auditif

Dégât aux oreilles
Changement permanent du seuil de l'audition
Changement temporaire du seuil de l'audition

Récepteur

Masquage de communication avec individus de la même espèce
Masquage d'autres bruits biologiquement importants
Interférences avec la capacité acoustique d'interpréter l'environnement
Changement adaptatif de vocalisations (avec efficacité et conséquences énergiques)

Comportemental

Interruption du comportement normal
Modification du comportement normal
Déplacement de région (court ou à long terme)

Stress

Vulnérabilité augmentée à maladie
Augmentation de l'impact des effets cumulatifs négatifs
Accoutumance au bruit qui provoque la permanence près des sources de perturbation

Effets indirects

Disponibilité réduite de proies

Vulnérabilité augmentée à prédation ou autres risques, tel que collisions avec les outils de pêche, échouages etc.

6. Méthodologie : caractéristiques du support d'enregistrement et d'analyse acoustique

Des expérimentations en mer ont été menées dans les Réserves Naturelles de Scandola, des Bouches de Bonifacio et dans le site Natura 2000 des Agriate afin de qualifier et de quantifier le niveau sonore sous-marin.

Les sons produits par les bateaux ont été enregistrés avec un hydrophone immergé dans l'eau pendant les périodes de passage du trafic nautique le plus intense ou au moment du passage des bateaux passagers. Grâce à un logiciel, nous avons calculé en temps réel le spectrogramme des sons écoutés ce qui permettait ainsi d'associer l'ouïe à la vue pour la détection du bruit. Les signaux enregistrés sur un ordinateur, lors des sorties en mer, ont été ensuite traités et analysés en laboratoire.

Les passages des bateaux ont été notés sur une fiche de terrain dans la quelle les bateaux sont divisés par type (bateau passager, bateau hors bord, bateau in bord, voilier et jet ski), longueur et direction du trajet (Annexe-Tableau N.3).

Les fichiers acoustiques du bruit produit par le passage du trafic nautiques ont été enregistrés à l'aide du logiciel «Sea Wave», puis découpé en fichiers correspondants au passage de chaque bateau en utilisant le logiciel «Cool Edit Pro», pour être enfin analysés avec le logiciel «Spectra Plus». Le dernier logiciel nous permet d'obtenir les valeurs acoustiques qui caractérisent chaque son et qui ont été utilisés pour le traitement statistique. Tous les enregistrements ont été faits avec les mêmes configurations des instruments pour d'obtenir des valeurs comparables entre elles.

Tous les enregistrements ont été faits avec des conditions de mer calme et absence du vent fort pour écarter l'enregistrement des bruits produits par le vent et les vagues.

7. Campagnes d'enregistrements acoustiques en mer

7.1. Campagnes 2004

Huit campagnes d'enregistrements du bruit produit par le passage du trafic nautique ont été menées dans la Réserve Naturelle de Scandola et dans les Agriate.

Les périodes d'enregistrements ont été décidés, en accord avec le gens du lieu (gardes de la Réserve Naturelle ou skipper), sur la base du trafic nautique le plus intense. Les sites d'enregistrement ont été choisis pour les bonnes caractéristiques du mouillage et la profondeur adaptée aux enregistrements acoustiques (Annexe Illustrations N.7-8).

Tous les enregistrements ont été faits entre 10 et 12 heures le matin et entre 16 et 18 heures l'après-midi, ce qui correspond aux moments de sortie et de retour au port des bateaux.

7.2. Campagne 2005

Six campagnes d'enregistrements du bruit produit par le passage du trafic nautique ont été menées dans la Réserve Naturelle de Scandola et dans la réserve Naturelle des Bouches de Bonifacio.

De la même façon qu'en 2004, les périodes d'enregistrements et les sites de mouillages ont été définis pour récolter les meilleurs échantillons. (Annexe Illustrations N.8-9). Pour obtenir des

informations différentes et enrichir l'étude, l'attention a été focalisée sur l'enregistrement du bruit produit par les bateaux passagers qui effectuent de nombreux passages au sein des Réserves Naturelles. Quand cela a été possible nous avons enregistré les bateaux passagers plusieurs fois en divisant les enregistrements en trois catégories :

- 1. source à une distance comprise dans les 50m de l'hydrophone ;
- 2. source à une distance comprise entre le 50m et le 100m de l'hydrophone ;
- 3. source à une distance maximum de 100m par rapport à l'hydrophone.

Les enregistrements ont été faits au moment du passage du bateau à la perpendiculaire du récepteur (bateau où l'hydrophone était calé), pour standardiser le plus possible les paramètres. Quatre campagnes en mer dont l'objectif était l'enregistrement des vocalisations des dauphins pendant le passage des bateaux ont été menées dans les mêmes zones. Ces enregistrements avaient pour objectif de vérifier si les dauphins augmentent leur niveau de vocalisation pour continuer à rester en contact entre eux, pendant le passage des bateaux et s'ils changent leurs comportements acoustique (Annexe Illustration N.10).

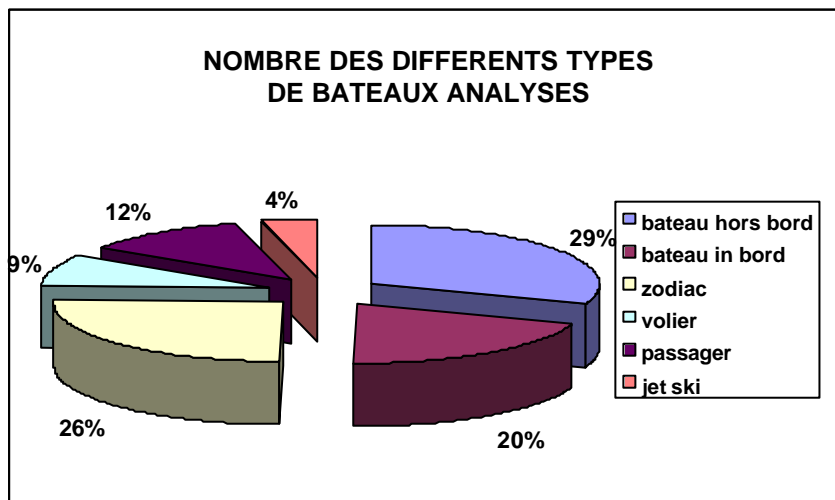
8. Résultats

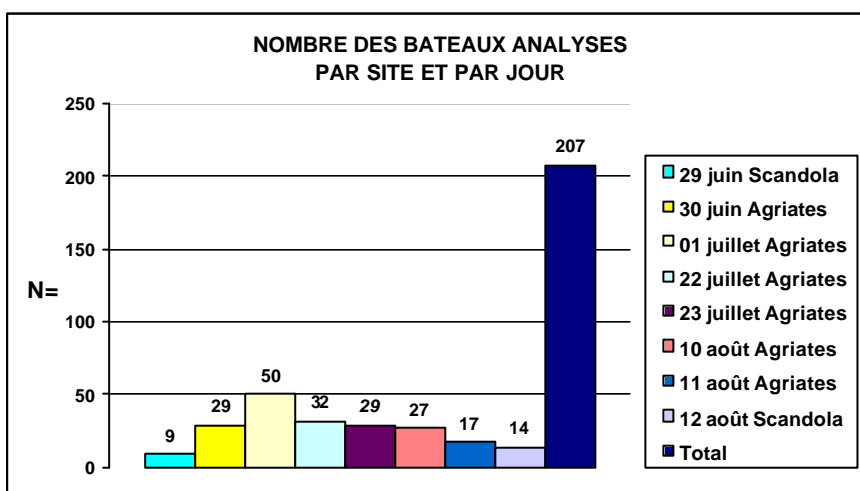
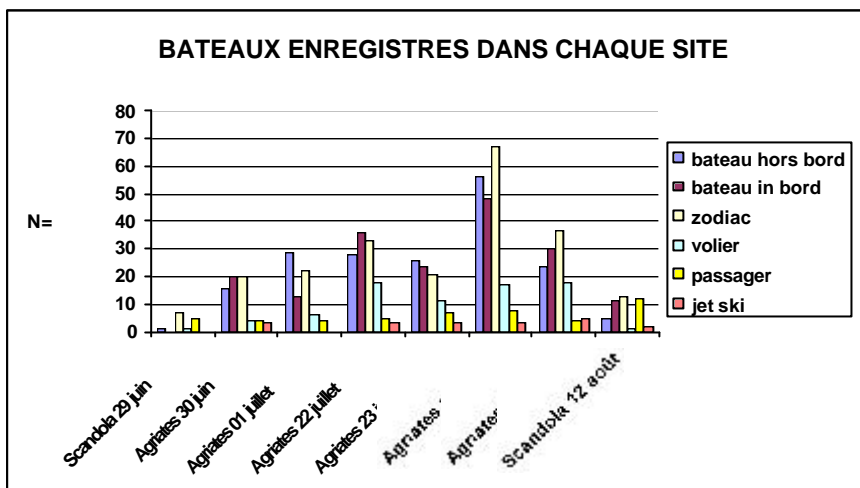
8.1. Résultats 2004

Les campagnes d'enregistrements ont été menées le 29 et le 30 juin; le 01, le 22 et le 23 juillet; le 10, le 11 et le 12 août 2004. Pendant les 18 heures d'enregistrements effectués ont été enregistrées 731 bateaux. De tous les fichiers nous avons choisi 14 heures et demi d'enregistrements qui ont été traitées. Après le découpage des fichiers nous avons sélectionné les sons qui avaient les caractéristiques acoustiques suffisantes pour être analysés.

Un total de 207 enregistrements de bateaux a été sélectionné et analysé.

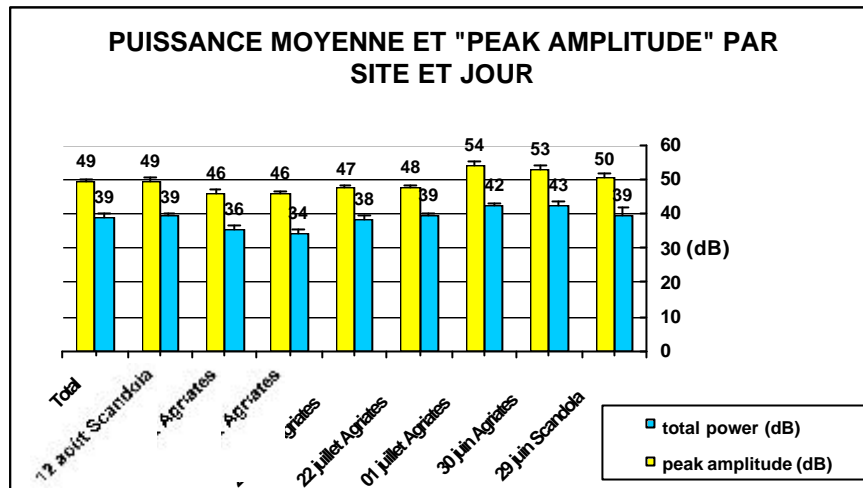
Dans les graphiques suivants sont représentés les valeurs correspondant à l'analyse statistique du nombre et du type de bateaux enregistrés et analysés par site et par jour.



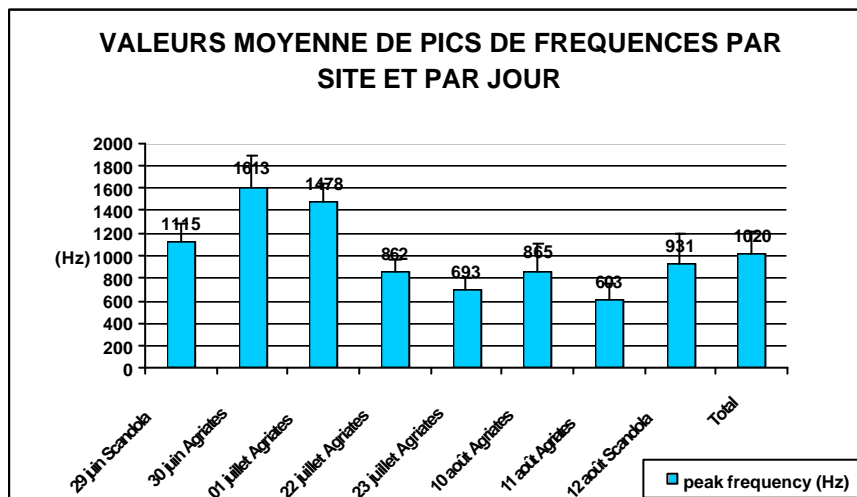


Chaque passage de bateau a une durée moyenne de 42 secondes.

L'analyse des paramètres acoustiques a donné les valeurs correspondantes à la puissance totale du pic d'amplitude qui est représentés dans le graphique suivant par rapport au site et jour d'enregistrement. Les mesures de pression sont en dB (re 1 μ Pa à 1m).

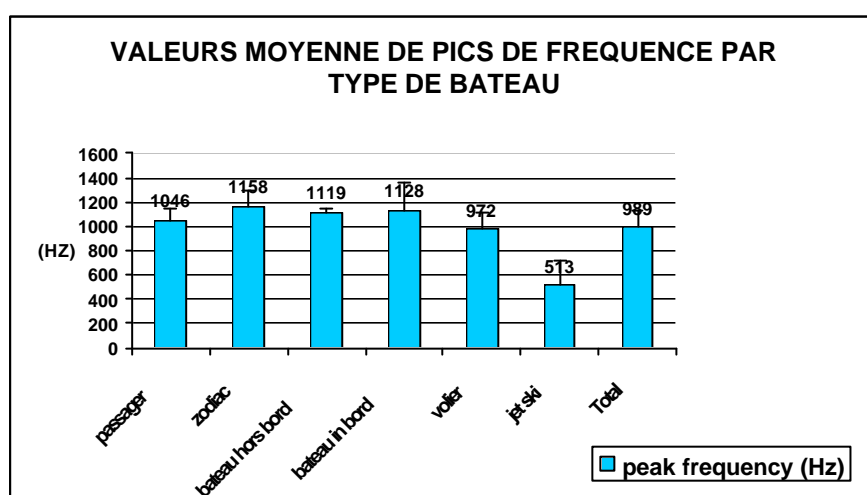
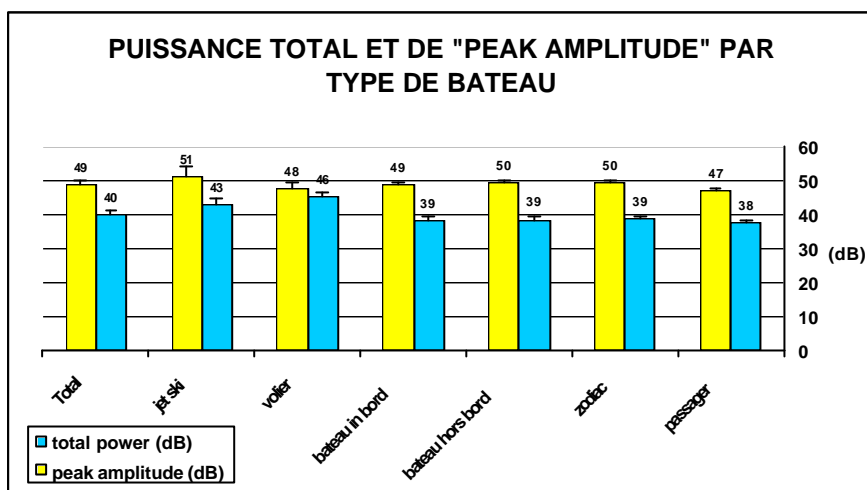


Nous avons également analysé la fréquence moyenne caractéristique par jour et par site, visible dans le graphique suivant.



La deuxième partie de l'analyse statistique a été faite en considérant les caractéristiques acoustiques de chaque type de bateau.

Les valeurs de la puissance totale, du pic d'amplitude et du pic de la fréquence, qui caractérisent chaque type de bateaux, sont visibles dans les deux graphiques suivants.



La fréquence et la puissance maximale par type de bateau sont :

Type bateau	Passager	Zodiac	Hors bord	In bord	voilier	Jet Ski
Fréquence maximale (Hz)	1500	5300	5900	5600	1500	1400
Puissance du pic maximal (dB)	53	62	63	61	55	66

Les spectrogrammes des différents types de bateaux sont visibles dans les Illustrations N.11-16 (Annexe).

8.2. Résultats 2005

Les campagnes d'enregistrements ont été menées le 24, le 26, le 27 et le 28 juin; le 18, le 19, le 20 et le 21 juillet; le 17 et le 18 août, le 24 et le 25 septembre 2005. Pendant les 12 jours d'enregistrements effectués ont été enregistrés 43 bateaux passagers sur les quels nous avons concentré l'étude de cette année. L'autre paramètre que nous avons considéré est la distinction entre les moteurs 2 temps et 4 temps. Pour cette analyse nous avons enregistré 50 bateaux mais pour seulement 17 nous avons pu nous assurer qu'il s'agissait bien d'un bateau moteur 2 ou 4 temps. Après le découpage des fichiers nous avons sélectionné les sons qui avaient les caractéristiques acoustiques suffisantes pour être analysé.

Sur les enregistrements des dauphins nous avons essayé d'établir une relation entre les caractéristiques des vocalisations pendant le passage des bateaux et en absence de bruit du moteur.

Dans les graphiques suivants sont représentés les valeurs correspondant à l'analyse statistique des caractéristiques des bateaux passagers dans les Réserves des Bouches de Bonifacio et de Scandola.

Chaque passage de bateau a une durée moyenne de 46 secondes.

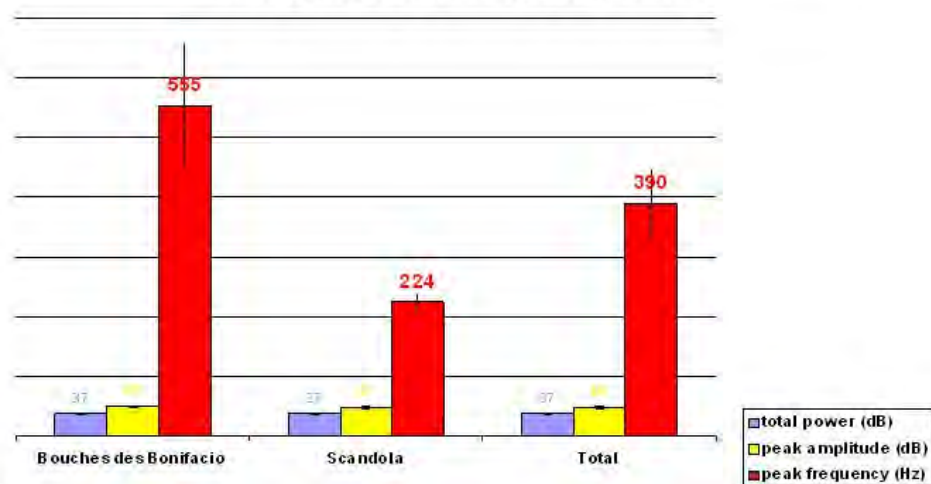
L'analyse des paramètres a donné les valeurs correspondantes à la puissance totale, au pic d'amplitude et à la fréquence moyenne qui sont représentés dans les graphiques suivants par rapport aux bateaux passagers dans chaque Réserve et pour chaque bateau.

Les mesures de pression sont en dB (re 1 μ Pa à 1m).

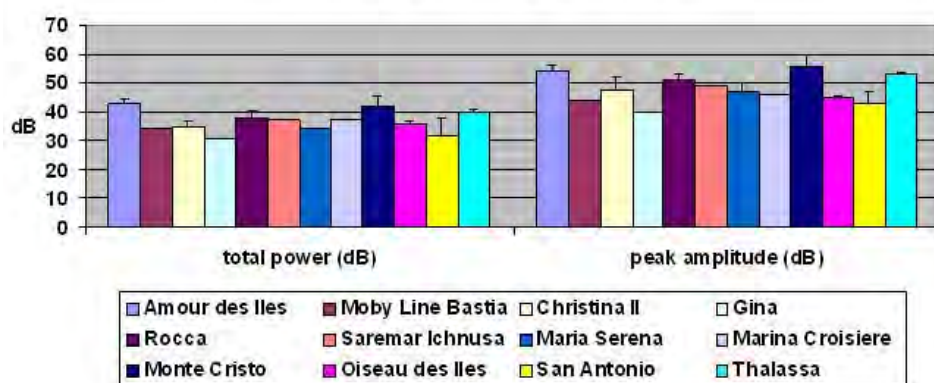
Les spectrogrammes relatifs aux enregistrements des bateaux passagers sont visibles dans les Annexes Illustrations N. 17-62. Quand cela a été possible nous avons répété l'enregistrement de chaque bateau passager en les divisant en trois catégories en fonction de la distance de la source (bateau) au récepteur (hydrophone) :

- passage à plus de 100m de l'hydrophone
- passage entre 50 et 100m de l'hydrophone
- passage à moins de 50m de l'hydrophone

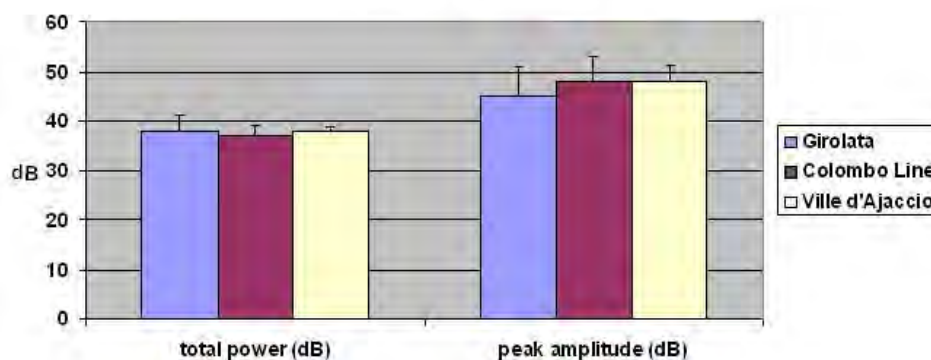
Caractéristiques du bateaux passagers dans les Réserves des Bouches de Bonifacio et Scandola



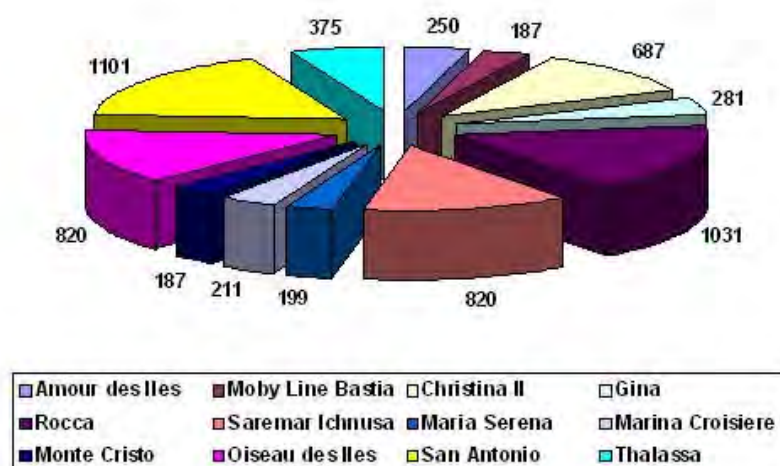
Caractéristiques du puissance des bateaux passagers dans la Réserve des Bouches de Bonifacio



Caractéristiques du puissance des bateaux passagers dans la Réserve de Scandola



Caractéristiques de fréquences (Hz) du bateaux passagers dans la Réserve des Bouches de Bonifacio



Caractéristiques de fréquence (Hz) moyenne du bateaux passagers dans la Réserve de Scandola



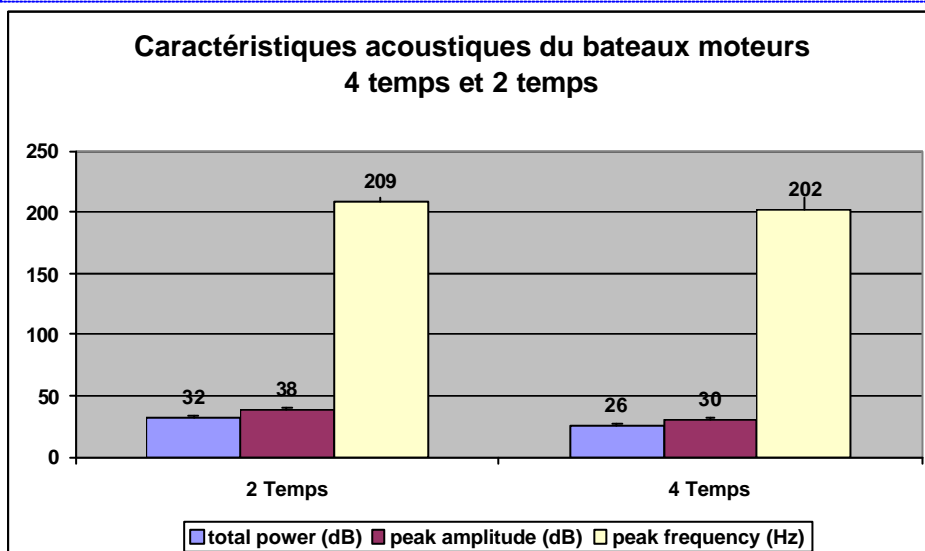
■ Girolata ■ Colombo Line □ Ville d'Ajaccio

Dans le graphique suivant sont représentées les valeurs correspondant à l'analyse statistique des caractéristiques des bateaux à moteur 2 temps et 4 temps enregistrés dans la Réserve des Bouches de Bonifacio. L'analyse des paramètres a donné les valeurs correspondantes à la puissance totale, au pic d'« amplitude » et à la fréquence moyenne.

Les mesures de pression sont en dB (re 1 μ Pa à 1m).

Chaque passage de bateau a une durée moyenne de 32 secondes.

Supprimé : E



Les enregistrements des sifflements ont été menés dans la Réserve des Bouches de Bonifacio dans la Baie de Rondinara qui est caractérisée par une conformation du fond et une couverture de posidonie qui lui confère des caractéristiques acoustiques particulièrement adaptées à l'expérimentation menée. L'enregistrement d'un groupe de dauphins de l'espèce *Tursiops truncatus* occupés dans une intense activité de chasse a eu lieu pendant le passage de

plusieurs bateaux à moteur. Les spectrogrammes relatifs aux enregistrements sont visibles dans les Annexes N. 63-68.

9. Caractéristiques acoustiques des vocalisations du Grand dauphin.

Pendant la réalisation d'une autre étude, en collaboration avec l'Equipe Ondes et Acoustiques de l'Université de Corse, nous avons réalisé des enregistrements de dauphins de l'espèce *Tursiops truncatus* dans la Prud'homie de Balagne, entre Calvi e l'Ile Rousse.

Une partie des données ont été enregistrée pendant les mois du mai et juin 2002; des autres pendant le mois de mai 2003. Les signatures acoustiques de 15 exemplaires du Grand dauphin ont été analysé d'un point de vue acoustique (Annexe Illustration N.10).

Les paramètres considérés et les valeurs statistiques sont regroupés dans le tableau suivant. Les mesures de pression sont en dB (re 1 μ Pa à 1m).

Nous avons enregistré un sifflement avec une fréquence minimale de 5,1kHz.

Fréquence moyenne initiale (kHz)	16
Niveau moyen sonore (dB)	70
Fréquence moyenne finale (kHz)	16
Niveau moyen sonore (dB)	66
Fréquence moyenne minimale (kHz)	13
Niveau moyen sonore (dB)	74
Fréquence moyenne maximale (kHz)	24
Niveau moyen sonore (dB)	75
Puissance moyenne du sifflement (dB)	71
Fréquence moyenne du sifflement (kHz)	17
Durée moyenne du sifflement (secondes)	1,6

Tableau N.4. Caractéristiques de fréquence et de puissance des sifflements du grand dauphin en Corse.

10. Discussion.

De 18 heures d'enregistrements effectués en 2004, nous avons décidé de focaliser l'attention sur les 14 heures et demi qui étaient les plus significatives au niveau de l'intensité du trafic nautique.

La sélection de sons, sur la base des caractéristiques acoustiques exploitables pour l'analyse et le traitement statistique, nous a permis de recueillir 207 enregistrements de bateaux.

Les résultats des valeurs de fréquence et de puissance obtenue par site et par jour, n'ont pas donné des différences significatives. Ainsi, les valeurs de fréquence et de puissance moyenne de chaque type de bateau sont similaires. Seuls les bateaux hors bord, les zodiac et les jets ski présentent une valeur du «peak amplitude» (Période) un peu plus élevée. Cette valeur plus élevée s'explique par la caractéristique navigation en «tapant sur les vagues». Les résultats relatifs aux pics de fréquence par type de bateau montrent que les voiliers et les jets ski possèdent, en moyenne, une fréquence plus basse par rapport aux autres. En revanche la puissance est comparable à celle d'un bateaux à moteur «classique». Les jets ski produisent un bruit qui est presque plus consistant dans l'air que sous l'eau, mais comme tous les moteurs à hydrojet, provoquent une agitation de l'eau dans la partie plus superficielle en changeant ses caractéristiques.

Pendant les 12 jours d'enregistrements effectués en 2005, 43 bateaux passagers ont été enregistrés la deuxième partie de l'étude est centrée sur ces enregistrements.

Les données montrent un pic moyen de fréquence sur les deux Réserves de 390Hz avec une différence considérable entre Les Bouches de Bonifacio (555Hz) et Scandola (224Hz). Cette différence importante de la fréquence moyenne de chacun des sites est fortement influencée par le nombre important de bateaux de promenade en mer enregistrés sur le site de la RNBB qui présentent de fortes fréquences moyennes.

Les résultats concernant la puissance totale et le « peak amplitude » sont plus proches avec une valeur moyenne respectivement de 37dB (RNBB) et 48dB (RNS). Ces différences de puissance résultent des conditions d'enregistrement. Sur le site d'enregistrement de la RNS la profondeur était faible induisant des écho et amplifiant ainsi la puissance reçue par l'hydrophone.

La caractérisation de chaque enregistrement pourra donner des informations particulières sur les caractéristiques acoustiques de chaque bateau passager en considérant que lorsque cela était possible nous avons enregistré plusieurs passages et distances différentes entre source et récepteur. Les résultats statistiques sont toujours faits en considérant les moyennes des valeurs.

La comparaison entre les données trouvées pendant notre étude et en bibliographie montre une différence par rapport aux valeurs de puissance, cette différence est due à la limitation des instruments utilisés et à l'absence de connaissance sur la distance de la source à l'hydrophone. En revanche les valeurs relatives aux fréquences sont confirmées en se trouvant dans la gamme donnée (Tableau N.2).

En comparant les données 2004 et 2005 relatives aux bateaux passagers on observe une différence assez importante entre la moyenne du pic de fréquence probablement due aux différents sites considérés, première année Scandola et les Agriates, deuxième année Scandola et les Bouches de Bonifacio. En plus, il faut considérer que seulement la deuxième année nous avons amélioré le protocole d'étude en se concentrant sur les bateaux passagers qui nous a permis la caractérisation spécifique de chaque bateau.

L'autre paramètre que nous avons considéré est la distinction entre les moteurs 2 temps et 4 temps. Après le découpage des fichiers nous avons sélectionné les sons qui avaient les caractéristiques acoustiques suffisantes pour être analysés. Les résultats de cette analyse montrent des valeurs supérieures en terme de puissance totale, du pic d'« amplitude » et de fréquence pour les moteurs 2 temps par rapport aux moteurs 4 temps.

Sur les enregistrements des dauphins nous avons essayé d'établir une relation entre les caractéristiques des vocalisations pendant le passage des bateaux et en absence de bruit du moteur.

En général, la moyenne de la puissance totale des bateaux enregistrés et analysés (40dB) est plus basse que la puissance moyenne des sifflements de dauphins enregistrés en Balagne (71dB). La moyenne des fréquences du bruit produit par les bateaux (0,98 kHz) est plus basse que la moyenne des fréquences minimales qui caractérisent les sifflements des dauphins enregistrés en Corse en 2002 et 2003 (13kHz). Mais, si on considère la fréquence du pic maximal de chaque type de bateau on s'aperçoit que les bateaux types zodiac, in bord et hors bord, produisent des bruits avec une fréquence supérieure à 5kHz. Si on regarde les fréquences de communication typiques du Grand dauphin (4-22 kHz) et l'enregistrement d'un dauphin qui a été fait en 2003 pas loin de Calvi, avec une fréquence minimale de 5,1kHz, on s'aperçoit très facilement qu'on peut avoir des interférences. C'est à dire si pendant le passage d'un bateau qui produise un bruit caractérisé par une fréquence supérieure à 3-4 kHz, il y a des dauphins dans la même zone, ces derniers seront obligés à communiquer en utilisant des sons adaptés au bruit. La même chose ça peut se vérifier pour une superposition des puissances entre les bruits des bateaux et les sifflements des dauphins. Ce phénomène a été étudié en Floride où les dauphins (*Tursiops truncatus*) ont adaptés le répertoire vocal et comportemental par rapport au trafic nautique (Buckstaff, 2004).

Les données obtenues pendant les campagnes en mer réalisées en 2002 et 2003 (lors d'une autre étude) nous ont permis de faire une première analyse sur les caractéristiques des sifflements des dauphins dans la région de Balagne, en Corse. Toutefois, les dauphins enregistrés n'étaient pas exactement dans la même zone où se sont déroulées les campagnes pour étudier la pollution acoustique et surtout nous n'avons pas effectué les enregistrements en présence d'un trafic nautique consistant. De plus, la bibliographie existante nous suggère d'enregistrer les variations des caractéristiques des sifflements pendant le passage des bateaux. Pour évaluer si le bruit du moteur masque la communication entre les dauphins en provoquant une augmentation dans les fréquences utilisés, et un prolongement du sifflement (National Research Council, 2004).

Nous avons vu que en moyenne les dauphins enregistrés sifflent pour 1,6 secondes et que le passage d'un bateau est entendu par l'hydrophone pour un temps moyen de 42 secondes. Théoriquement en présence d'un bateau, un dauphin ne peut pas communiquer avec son groupe pour un temps qui est 26 fois supérieur de la durée de son sifflement. En plus, les

dauphins possèdent une habilité auditive supérieure à l'hydrophone utilisé, qui se traduit par une capacité d'audition du bruit du bateau pour un temps sûrement plus long. L'expérience de 2005 dans la Baie de Rondinara, montre en revanche que le groupe de dauphin en chasse a continué son activité sans se préoccuper des bateaux moteurs qui passaient à proximité, en produisant des sifflements et des trains de bulles, deux types d'émissions sonores typiques de cette activité. Nous avons observé le comportement du groupe de dauphins pendant une demi-heure en enregistrant le comportement visuel et acoustique pour une analyse à posteriori à fin de trouver des preuves de modification du comportement pendant l'activité. Ces modifications du comportement de chasse n'ont pas été observées.

11. Conclusion

En conclusion, seulement des études parallèles sur le comportement acoustique des dauphins pendant les périodes d'intense trafic nautique, pourront nous dire si vraiment le Grand dauphin est gêné par le passage des bateaux et quel type de changements est provoqué dans son comportement habituel. L'observation que nous avons effectuée nous a donné l'impression véritable que les dauphins arrivent à communiquer entre eux en sifflant même en présence d'un bruit provoqué par un bateau moteur. En effet un son modulé comme un sifflement peut être entendu dans un milieu bruité simplement en augmentant la puissance du son. En revanche n'ayant pas d'enregistrement de ce groupe de dauphin sans passage de bateaux nous ne pouvons pas définir s'il y a eu une augmentation de la puissance des vocalisations en présence du bruit anthropique. Cette hypothèse peut nous donner une explication à l'observation effectuée dans la Baie de Rondinara mais ne nous donne pas des indications sur la communication entre mère et nouveau-né. Si des modifications importantes du comportement étaient observées dans ce cas les effets pourraient être très graves..

Dans cette étude nous n'avons pas pu prendre en considération la vitesse des bateaux qui influence, sûrement, les caractéristiques du bruit analysé.

La variable « distance entre source et récepteur » a été considérée sur la base d'une estimation qui peut donner une idée mais qui ne peut pas être considérée comme une donnée exacte. En effet, nous n'avons pas eu à disposition un radar qui devait nous indiquer les données de vitesse et distance de bateaux enregistrés.

En conclusion l'étude menée en 2004 et 2005 dans les sites Natura 2000 de Corse (Scandola, Agriate et Bouches de Bonifacio) nous a permis de caractériser de façon acoustique les différents types de bateaux qui naviguent pendant l'été mais à cause de limitation des instruments nous avons seulement pu donner des indications relatives et non absolues de la pollution sonore et des conséquences en terme de conséquences dérangement des Grands dauphins.

12. Bibliographie

Ackman R.G., J.C: Sipos, C.A. Eaton, B.L. Hilaman, C. Lithfield. 1973. "Molecular species of wax esters in jaw fat of Atlantic bottlenose dolphin, *Tursiops truncatus*".

Lipids, vol.8, N°12, pp.661-666.

Amundin M., S. H. Andersen. 1983. " Bony nares air pressure and nasal plug muscle during click production in the harbour porpoise, *Phocoena phocoena*, and in the bottlenose dolphin, *Tursiops truncatus*". J. Exp. Biol., vol. 105, pp. 275-282.

Au W.L 1993. "Dolphin echolocation". Science, vol.260, p.1672.

Buckstaff, K.C.. 2004. Effects of watercraft noise on the acoustic behaviour of bottlenose dolphins, *Tursiops truncatus*, in Sarasota Bay, Florida Marine Mammals Science 20(4): 709-725
Cranford T., Amundin M., Norris K. S.. 1996. "Functional morphology and homology in the Odontocete nasal complex: implications for sound generation". Journal Morphology, vol. 228, pp. 223-285.

Evans, P.G.H., Canwell, P.J., and Lewis, E.J. 1992. An experimental study of the effects of pleasure craft noise upon bottlenose dolphins in Cardigan Bay, West Wales. *European Research on Cetaceans* 6: 43-46.

- Goodson A.D.**, M.Klinowska. 1990. "A proposed echolocation receptor for the bottlenose dolphin, (*Tursiops truncatus*): modelling the receive directivity from tooth and lower jaw geometry". *Sensory Abilities of Cetaceans*, pp.255-267.
- Gordon, J. C. D.**, Gillespie, D., Potter, J., Frantzis, A., Simmonds, M. P. and Swift, R. 1998. The Effects of Seismic Surveys on Marine Mammals. In: *Seismic and Marine Mammals Workshop*, London, UK.
- Halliday D.**, Resnick R., Walzer J. 1993. *Fondamenti di Fisica*. Casa Editrice Ambrosiana.
- Ingmasson D.E.**, W.J. Wallace. 1973. "Oceanology: an introduction" Wadsworth Publishing Co, Belmont, USA.
- Ketten D.R.** 1997."Structure and function in whale ears". *The International Journal of Animal Sound and its Recording*, vol.7, pp.103-135.
- Maggiani F.** "Modalità di produzione sonora e ricezione uditiva nei Cetacei, per la realizzazione di un dispositivo deterrente acustico, attraverso lo studio del biosonar". Tesi di Dottorato. Dicembre 2004.
- McCormick J.G.**, E.G. Wever, J. Palin. 1970. "Sound conduction in the dolphin ear". *Journal of the Acoustic Society of America*, vol.48, N°6 (part 2), pp.1418-1428.
- Morgane P. J.**, M.S. Jacobs, A. Galaburda. 1985. "Evolutionary aspects of cortical organization in the dolphin brain" pp. 71-98 in M.M.
- National Research Council.** 2004. *Ocean Noise and Marine Mammals*. Committee on Potential Impacts of Ambient Noise in the Ocean on Marine Mammals. Ocean Studies Board. Division on Earth and Life Studies. The National Academic Press, Washington D.C..
- Norris K.S.** 1969. "The echolocation of marine mammals". Pp 391-423 in H.J. Andersen (ed) "The biology of Marine Mammals". Academic Press, New York, NY.
- Reynolds III J.E.**, Rimmel S. A..1999. *Biology of Marine Mammals*. Smithsonian Institution Press.
- Richardson**, Green, Malme, Thomson. 1995. *Marine Mammals and Noise*. Academic Press.
- Ridgway S.H.**, T.H.Bullock, D.A.Carder, R.L.Seeley, D.Woods, R.Galambos. 1980. "Auditory brainstem response in dolphins". *Proceedings Natl. Acad. Sci USA*, vol.78, N°3, pp.1943-1947.
- Simmonds M & Dolman S** 1999. A note on the vulnerability of cetacean to acoustic disturbance. International Whaling Commission meeting, SC/51/E15.
- Swift R.**, Parsons C. and Dolmen S.. Science Report – Oceans of noise. WDCCS.
- Varanasi U.**, H.R. Feldman, D.C. Malins. 1975. "Molecular basis for formation of lipid sound lens in echolocating cetaceans". *Nature*, vol.255, pp.340-342.
- Wartzok D.**, D.R. Ketten. 1999."Marine mammals sensory system". Pp.-125- 131 in J.E. Reynolds III and S.A. Rommel (eds) "Biology of Marine Mammals". Smithsonian Institution Press, Washington and London.

13. Annexes

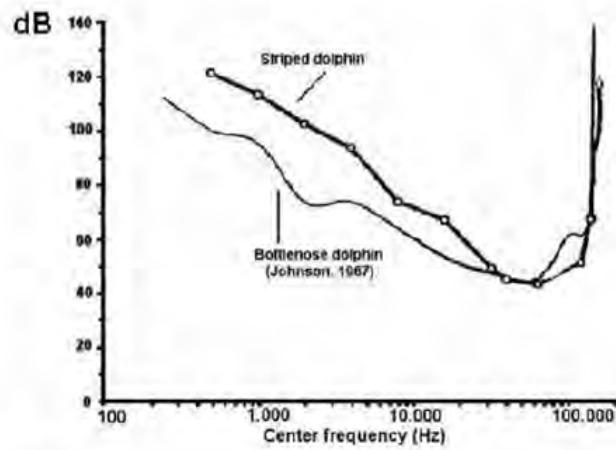
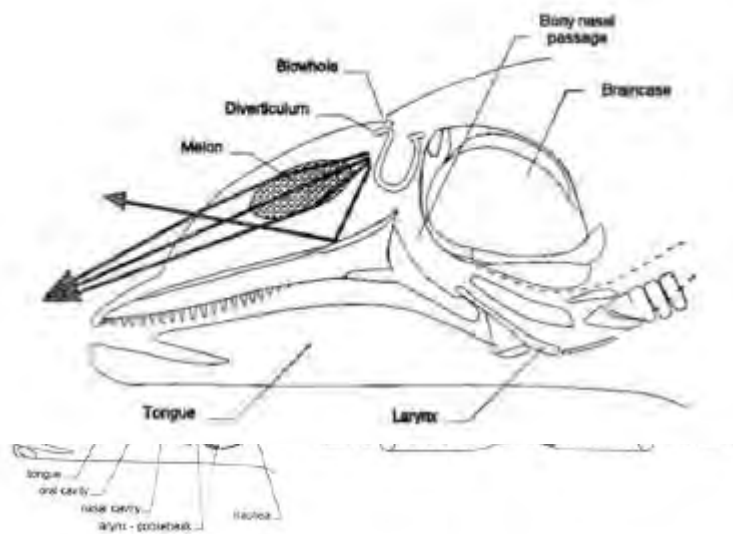


Illustration N. 1. Audiogramme de la capacité auditive du *Tursiops truncatus* et *Stenella coeruleoalba*.

Illustration N.2. Anatomie du système biosonar.



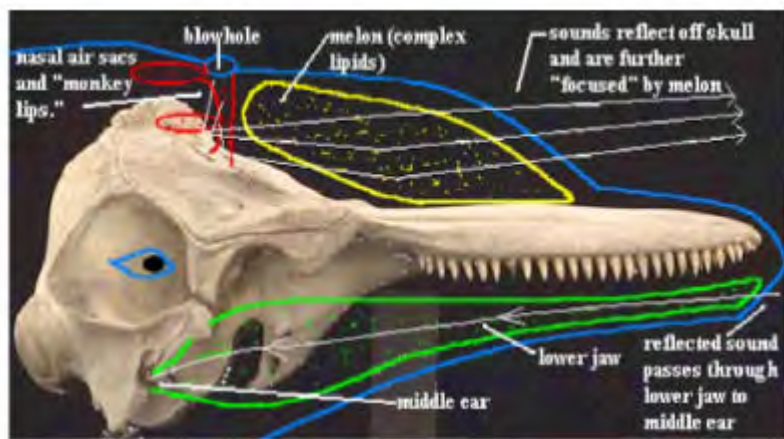


Illustration N.3. MLDB Complex et fonctionnement du biosonar.

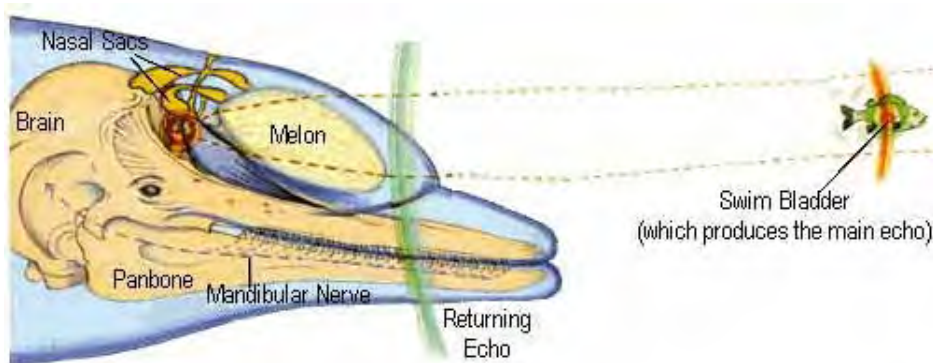
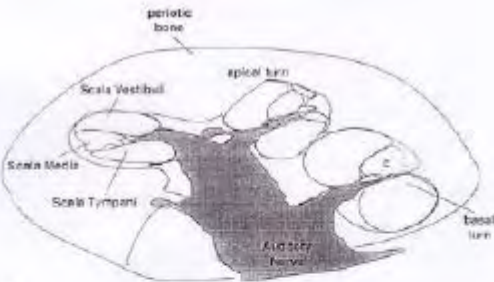


Illustration N.4. Melon et son fonctionnement.

[illegible]32

	10.33	10.34							
1	10.34		bh	x				x	
			bh	x			x		
	10.36	10.39							
2	10.39		z	x				x	
			v			x		x	
			z	x				x	
	10.42		v			x	x		
			v		x			x	
			v			x	x		
	10.43		bi			x		x	
			bi			x		x	
			bh	x				x	
	10.44	10.45	bh	x				x	
3	10.45		bi			x		x	
	10.46		z	x		x		x	
			bi					x	
	10.47		bi				x	x	
	10.48		v		x			x	
	10.50	10.51	v			x		x	
4	10.51		v			x		x	
	10.38		bh	x				x	
	10.54	10.56	bi				x	x	
5	10.55		bi				x	x	
	10.58		z	x				x	
			v			x	x		
			bi	x				x	
			bi		x		x		
	10.59		bh	x				x	
	11.00		z	x				x	
	11.01	11.02	p				x	x	
6	11.45		bh	x			x		
	11.49	11.50	v			x		x	
LEGENDA BATEAUX									
passager			p						
zodiac			z						
bateau hors bord			bh						
bateau in bord			bi						
voilier			v						
jet ski			js						

Tableau 3. Fiche du terrain pour les campagnes d'enregistrements.



Illustration N.7. Mortella : site d'enregistrements aux Agriates

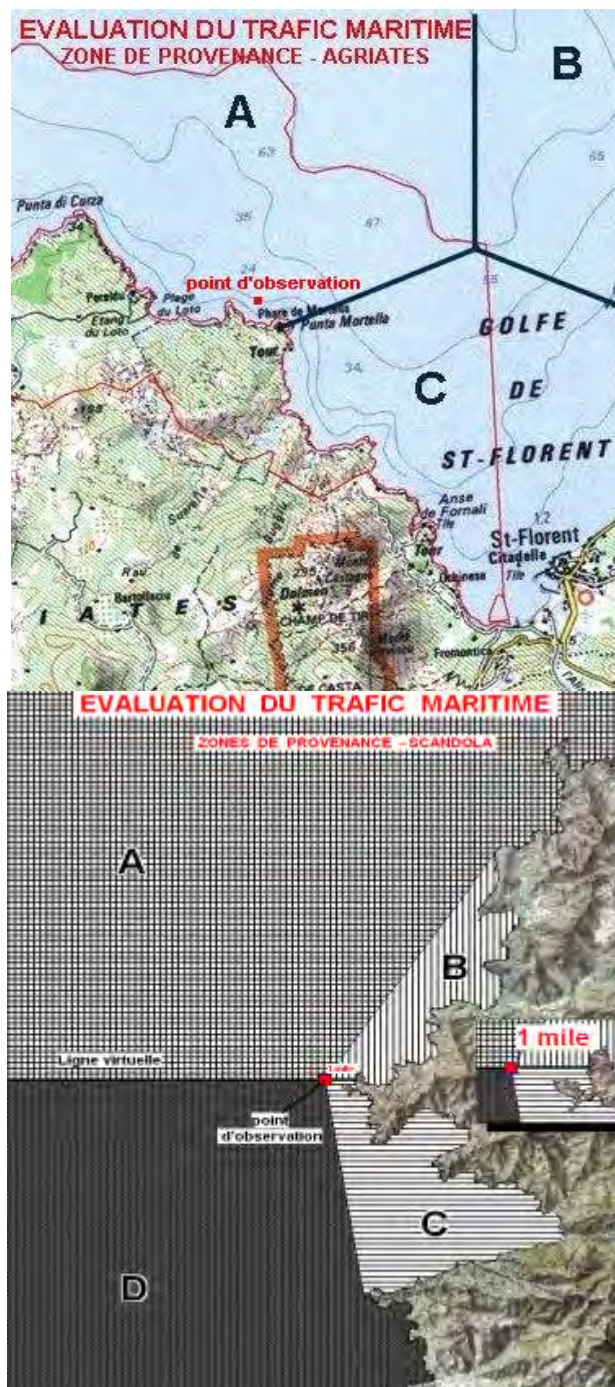


Illustration N.8. Carte des sites Agriates et Scandola avec les zones de provenance et le site du mouillage pour les enregistrements acoustiques.



Illustration N.9. Gargalo : site d'enregistrement dans la Réserve de Scandola

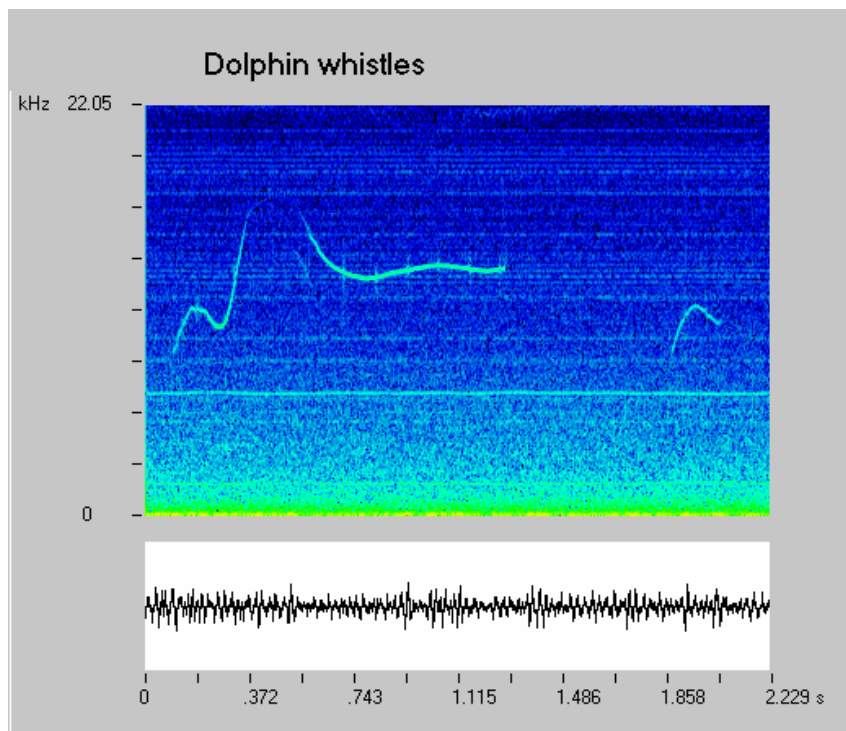


Illustration N.10. Exemple de signature acoustique du Grand dauphin.

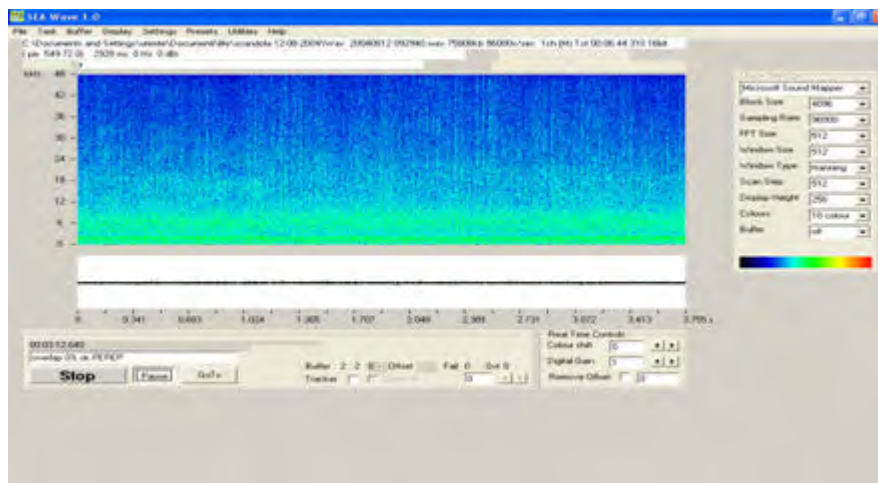


Illustration N.11. Spectrogramme du bruit produit par un bateau in bord.

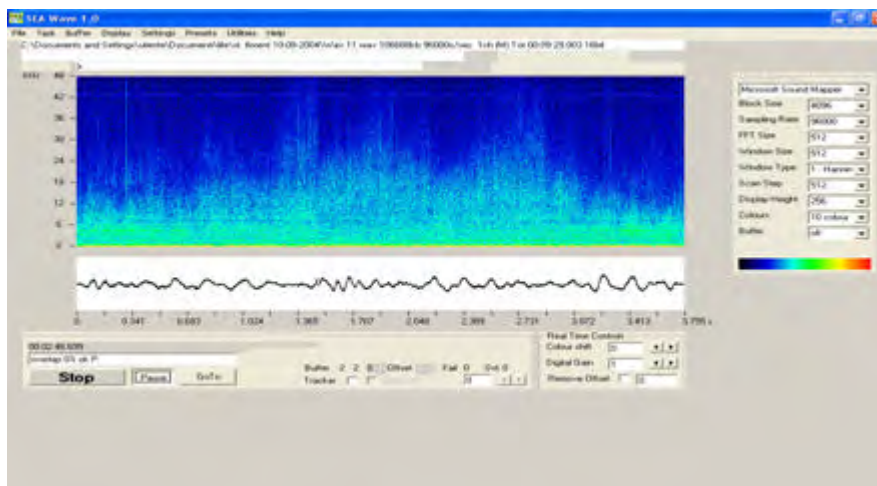


Illustration N.12. Spectrogramme du bruit produit par un bateau hors bord.

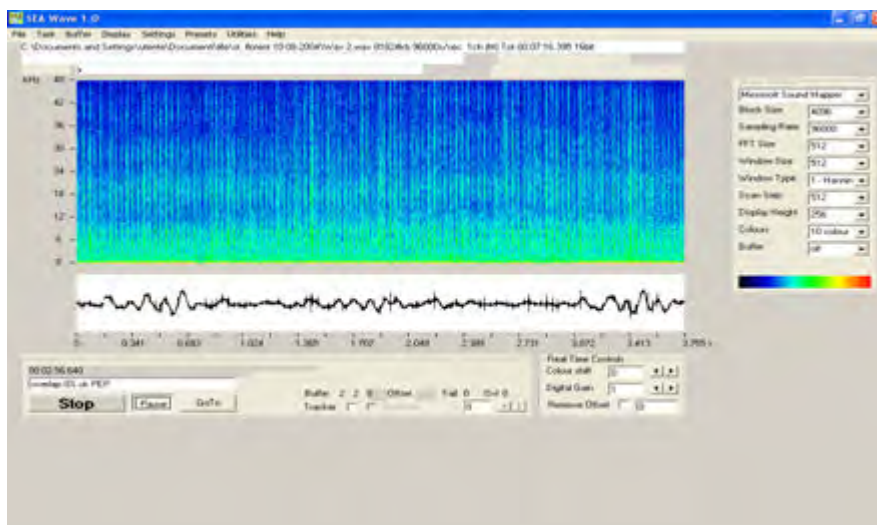


Illustration N.13. Spectrogramme du bruit produit par un zodiac.

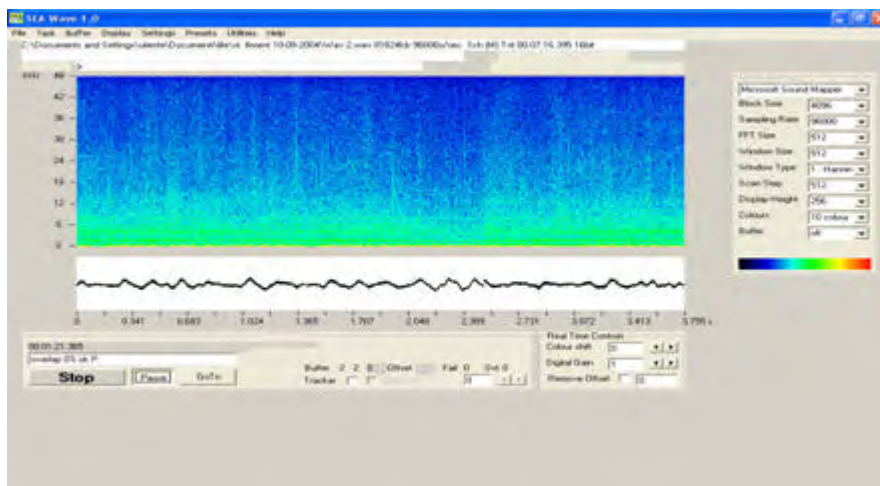


Illustration N.14. Spectrogramme du bruit produit par un bateau passager.

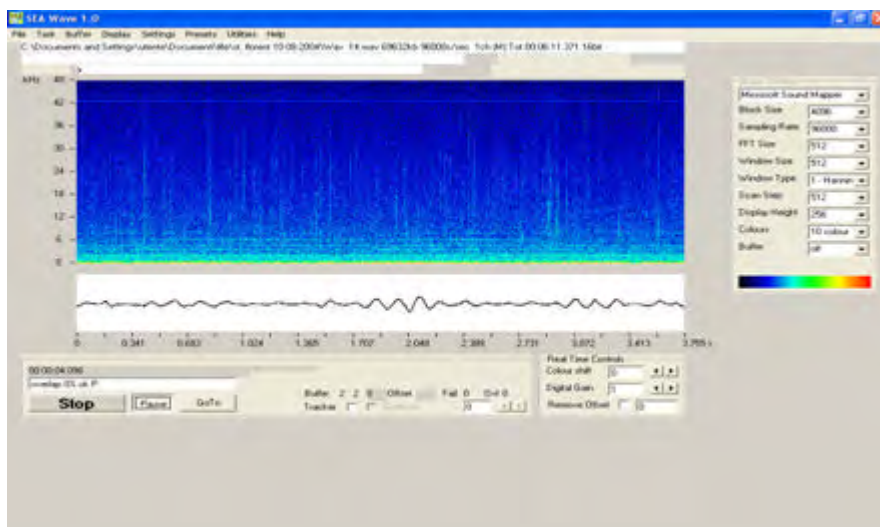


Illustration N.15. Spectrogramme du bruit produit par un voilier.

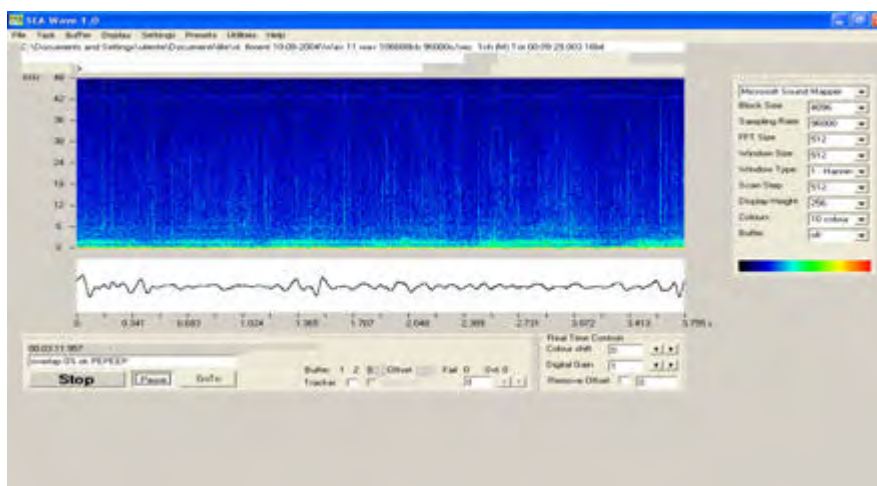


Illustration N.16. Spectrogramme du bruit produit par un jet ski.

BATEAUX PASSAGERS DANS LA RESERVE DE SCANDOLA

Colombo Line



Illustration N.17. Bateau passager de la Société Colombo Line

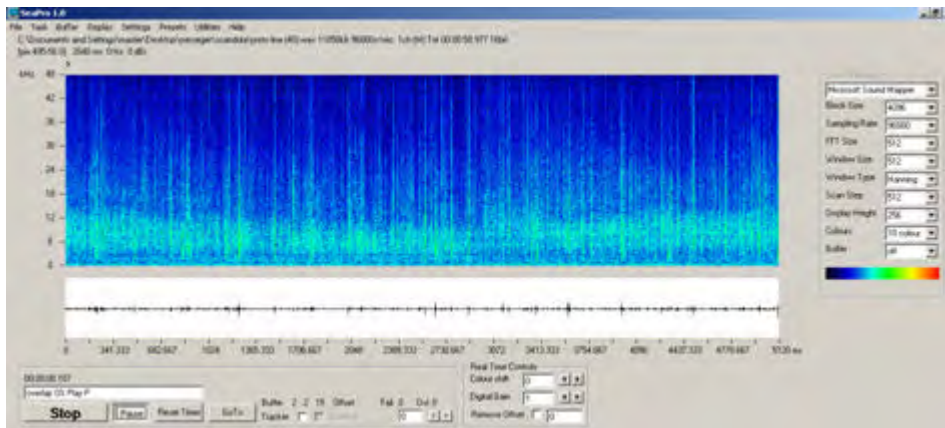


Illustration N.18. Spectrogramme : passage à plus de 100m de l'hydrophone

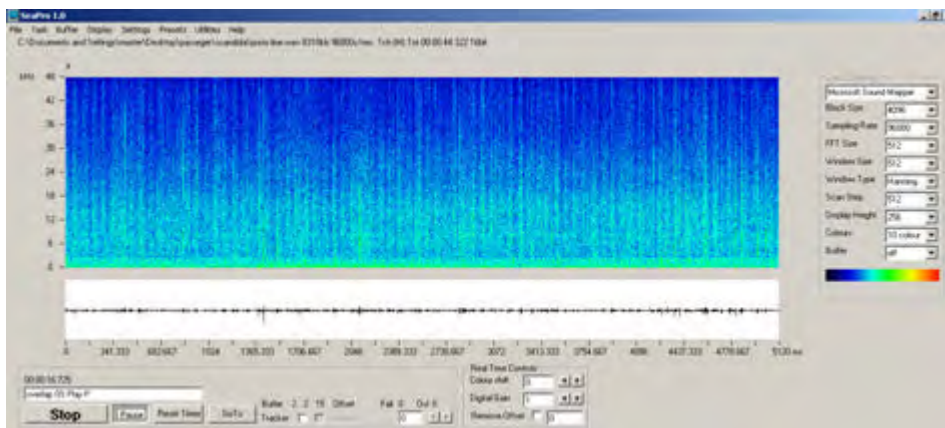


Illustration N.19. Spectrogramme : passage entre 50m et 100m de l'hydrophone

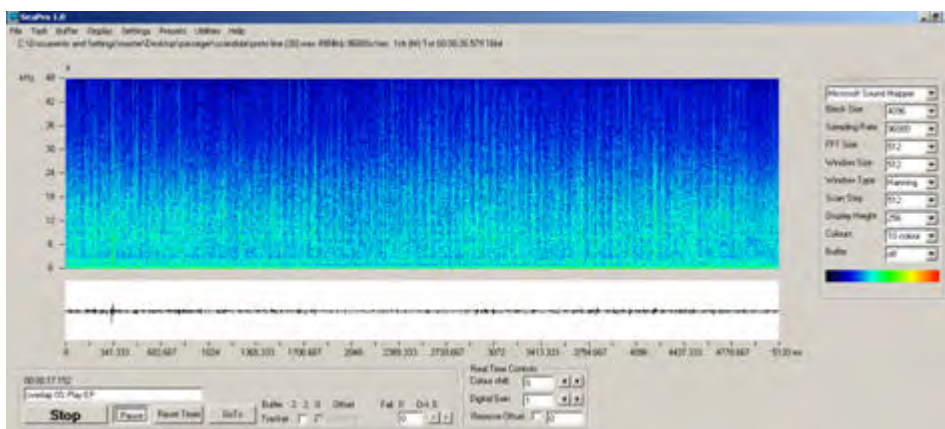


Illustration N.20. Spectrogramme : passage à moins de 50m de l'hydrophone

Girolata



Illustration N.21. Bateau passager

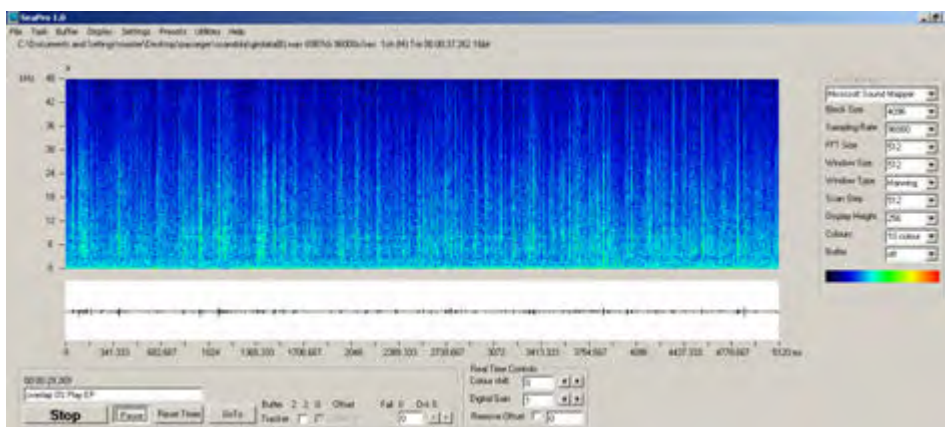


Illustration N.22. Spectrogramme : passage à plus de 100m de l'hydrophone

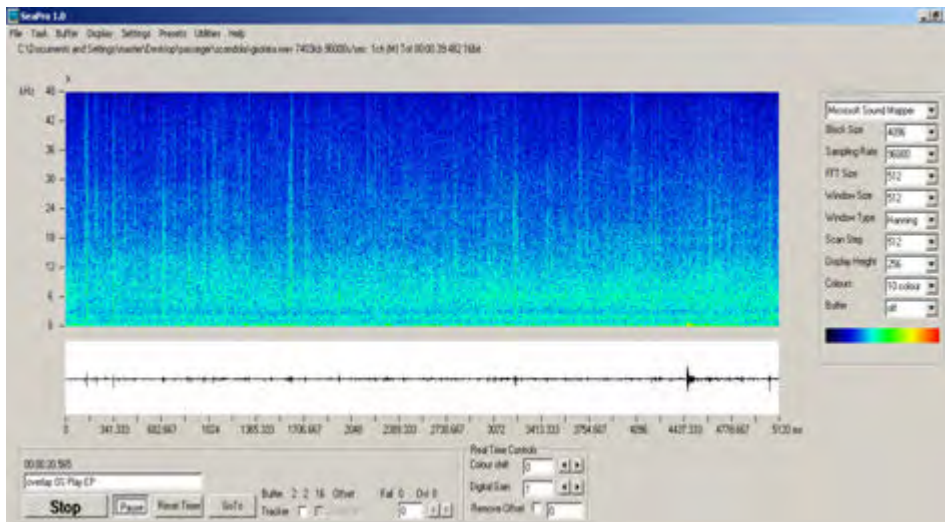


Illustration N.23. Spectrogramme : passage à moins de 50m de l'hydrophone

Ville d'Ajaccio

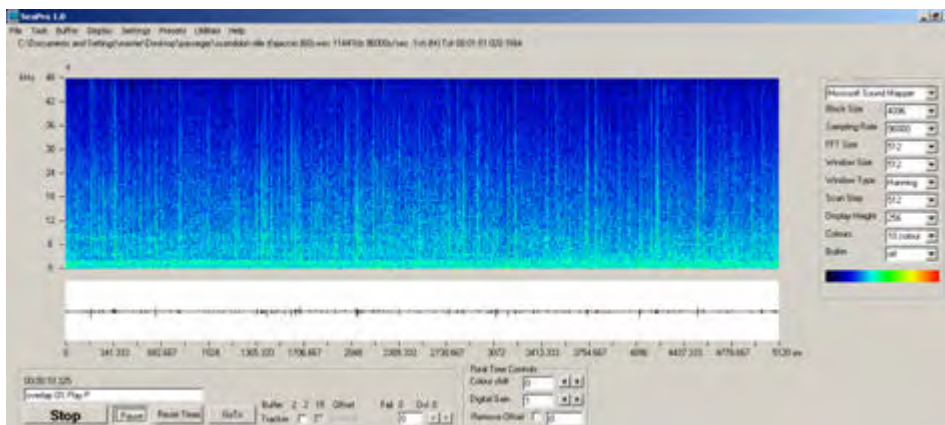


Illustration N.25. Spectrogramme : passage à plus de 100m de l'hydrophone

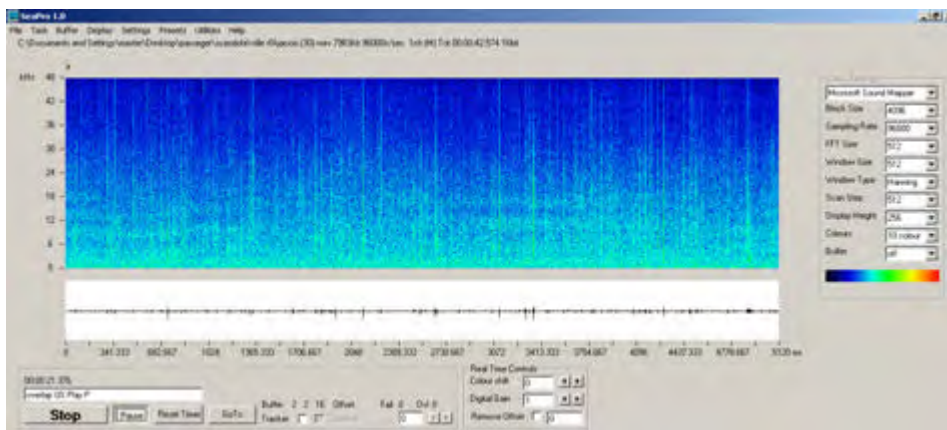


Illustration N.26. Spectrogramme : passage entre 50m et 100m de l'hydrophone

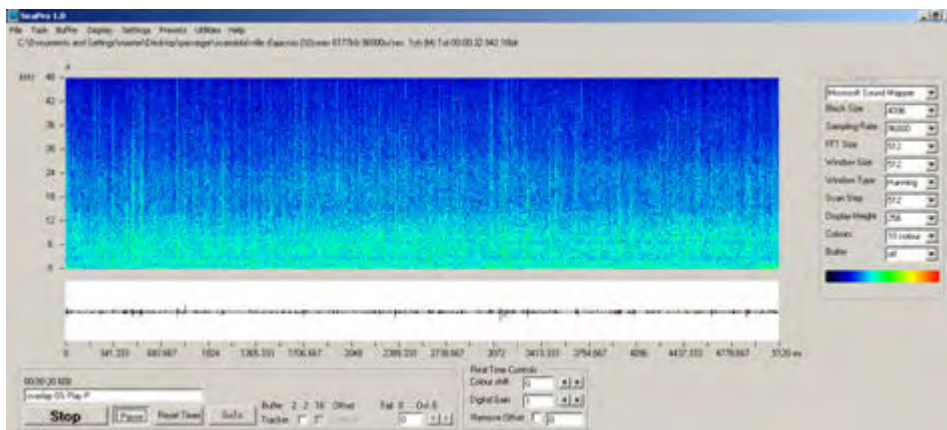


Illustration N.27. Spectrogramme : passage à moins de 50m de l'hydrophone

BATEAUX PASSAGERS DANS LA RESERVE DE BOUCHES DE BONIFACIO

Thalassa III



Illustration N.28. Bateau passager

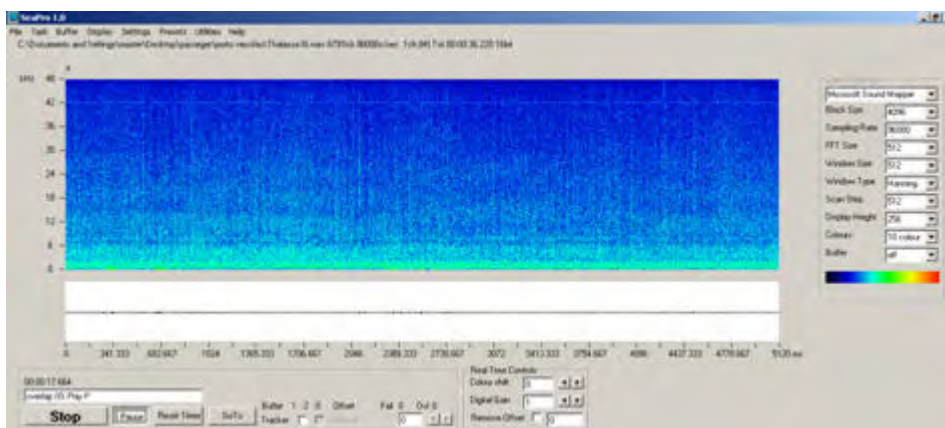


Illustration N.29. Spectrogramme : passage entre 50m et 100m de l'hydrophone
Thalassa Croisière



Illustration N.30. Bateau passager

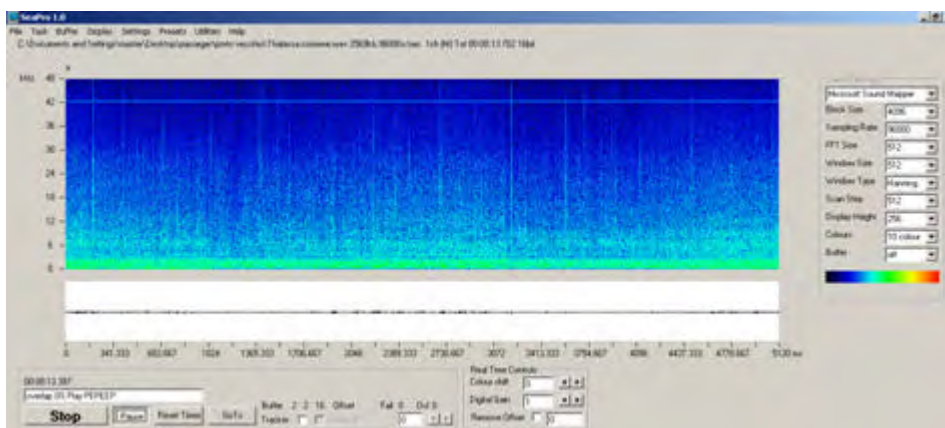


Illustration N.31. Spectrogramme : passage entre 50m et 100m de l'hydrophone

Amour des Iles



Illustration N.32. Bateau passager

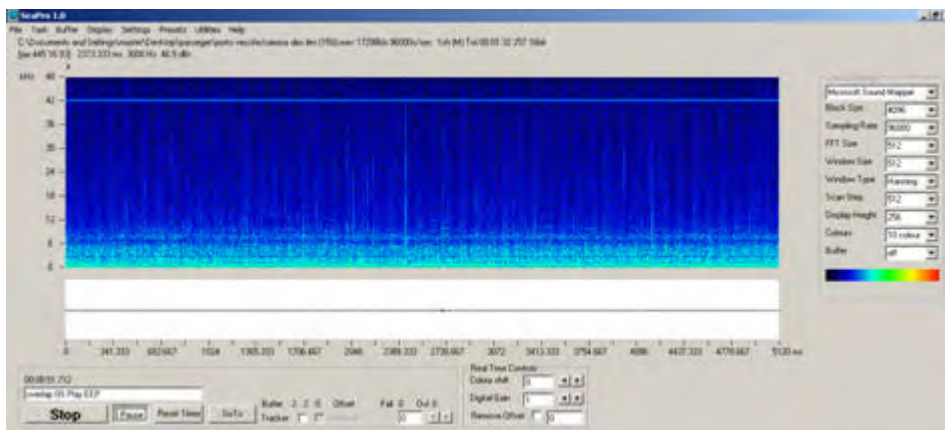


Illustration N.33. Spectrogramme : passage entre 50m et 100m de l'hydrophone

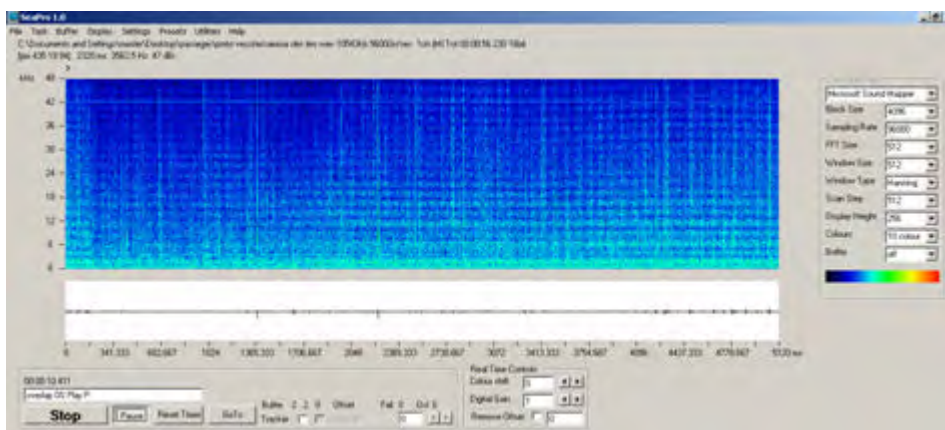


Illustration N.34. Spectrogramme : passage à moins de 50m de l'hydrophone

Christina II

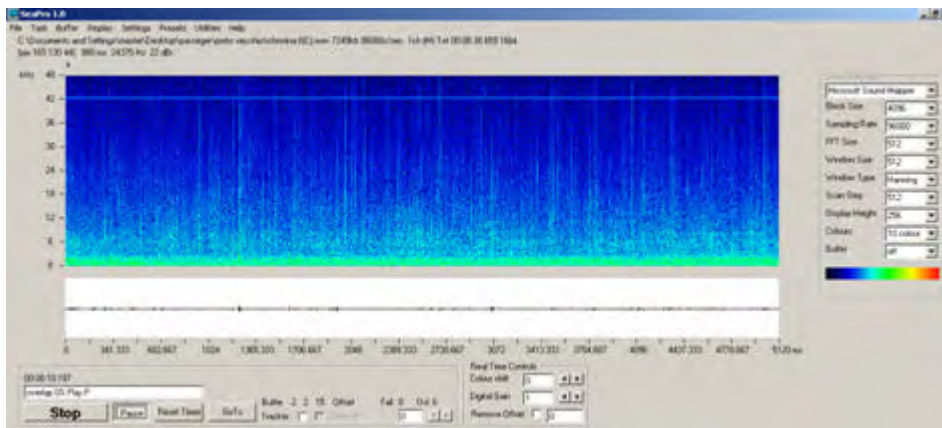


Illustration N.36. Spectrogramme : passage à plus de 100m de l'hydrophone

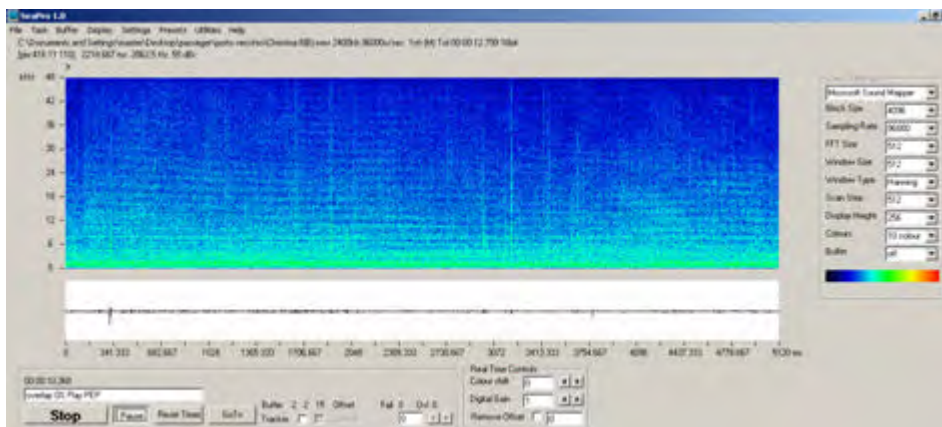


Illustration N.37. Spectrogramme : passage entre 50m et 100m de l'hydrophone

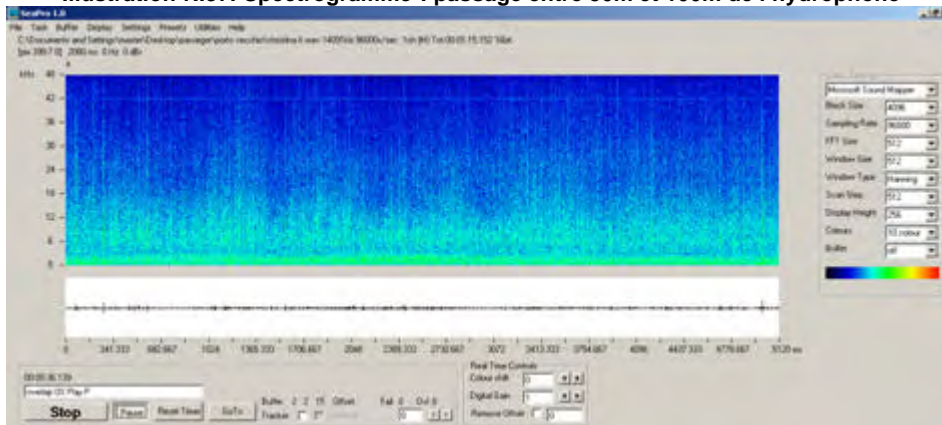


Illustration N.38. Spectrogramme : passage à moins de 50m de l'hydrophone

Gina

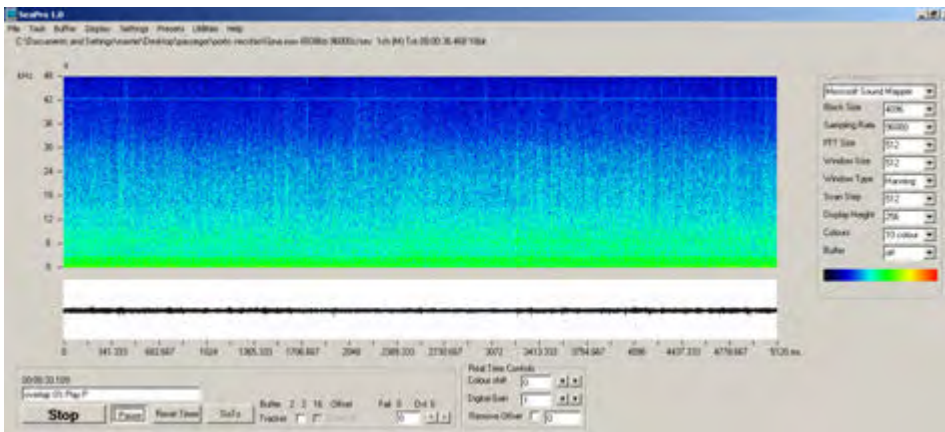


Illustration N.40. Spectrogramme : passage à moins de 50m de l'hydrophone

Rocca

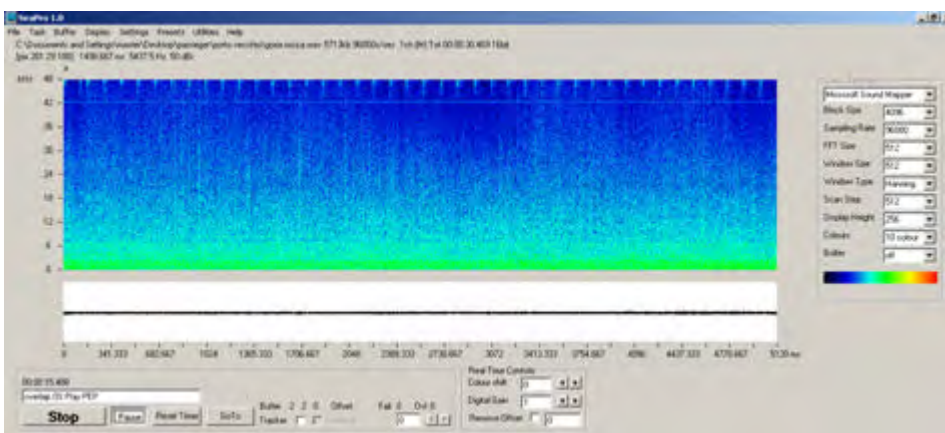


Illustration N.44. Spectrogramme Gloria: passage à moins de 50m de l'hydrophone

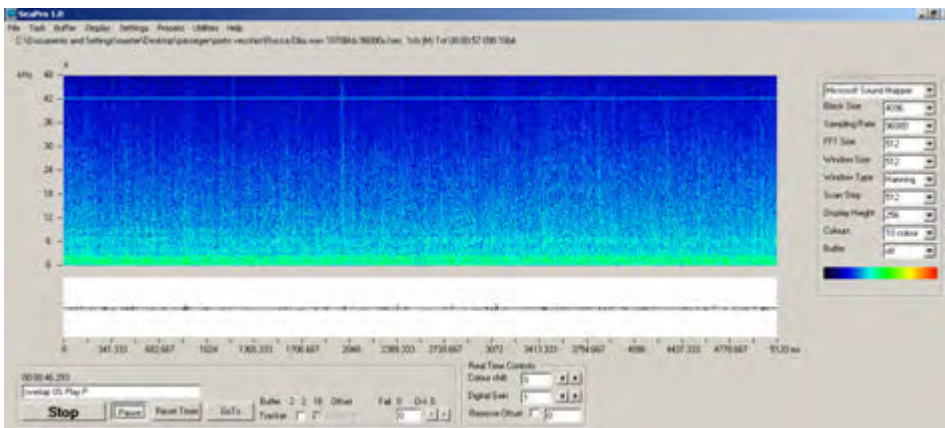


Illustration N.45. Spectrogramme Elbu: passage entre 50 et 100m de l'hydrophone

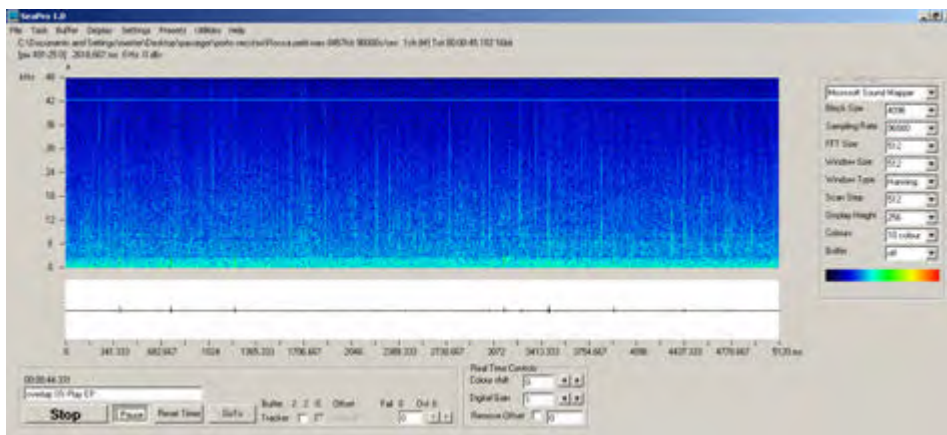


Illustration N.46. Spectrogramme du ...: passage entre 50 et 100m de l'hydrophone
Maria Serena

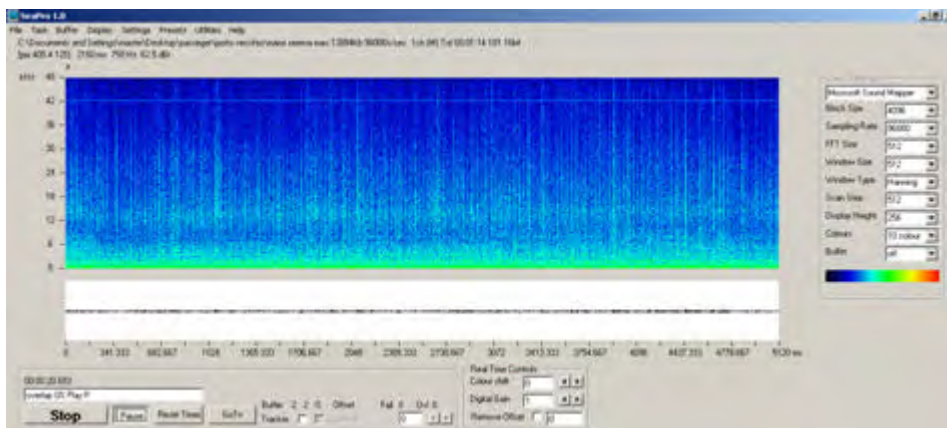


Illustration N.48. Spectrogramme : passage entre 50m et 100m de l'hydrophone

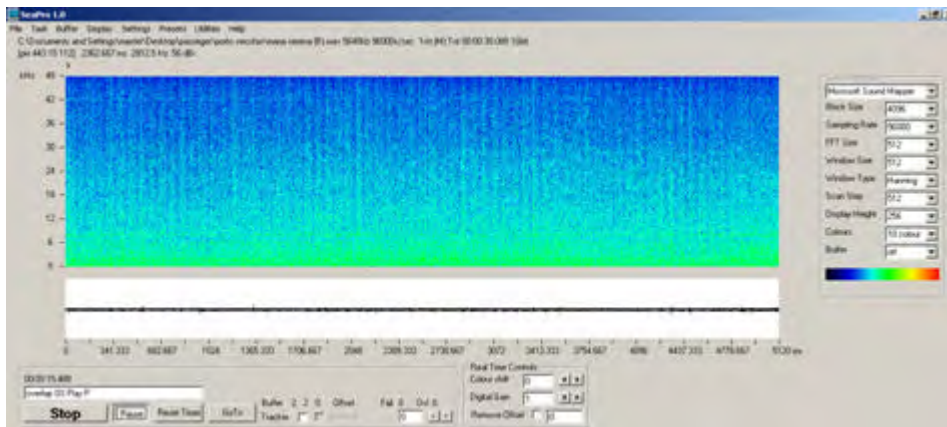


Illustration N.49. Spectrogramme : passage à moins de 50m de l'hydrophone

Marina Croisière

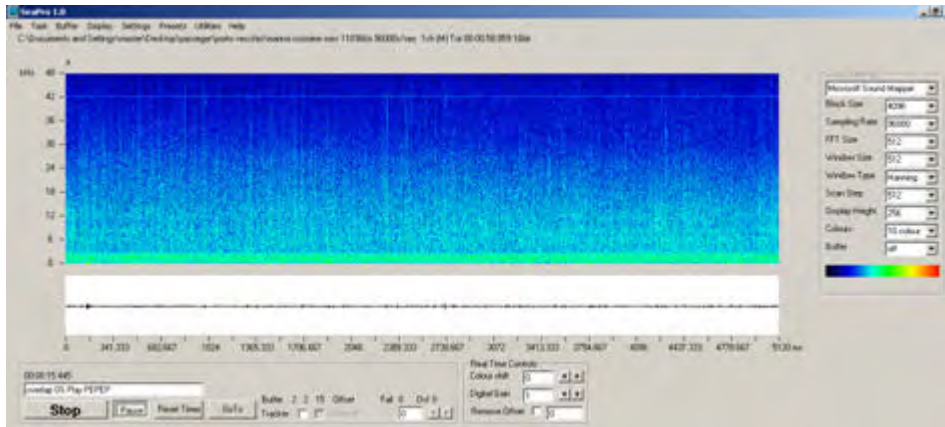


Illustration N.51. Spectrogramme : passage entre 50m et 100m de l'hydrophone

Monte Cristo

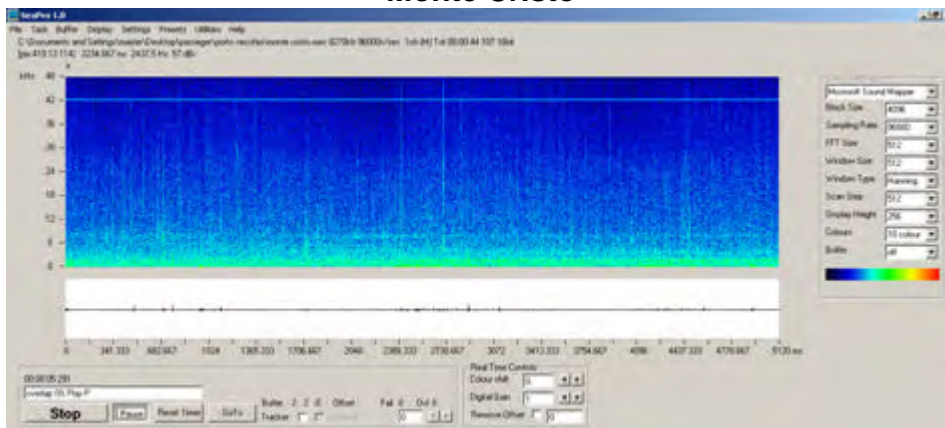


Illustration N.53. Spectrogramme : passage entre 50m et 100m de l'hydrophone

Oiseau des îles

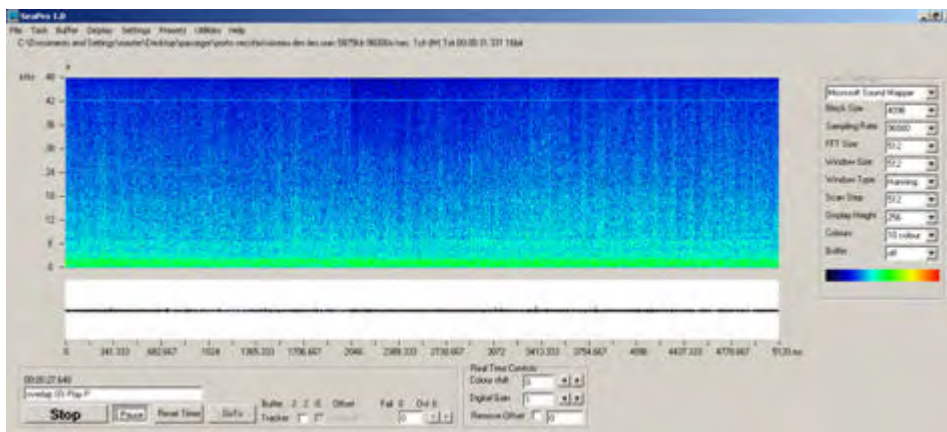


Illustration N.55. Spectrogramme : passage entre 50m et 100m de l'hydrophone

San Antonio

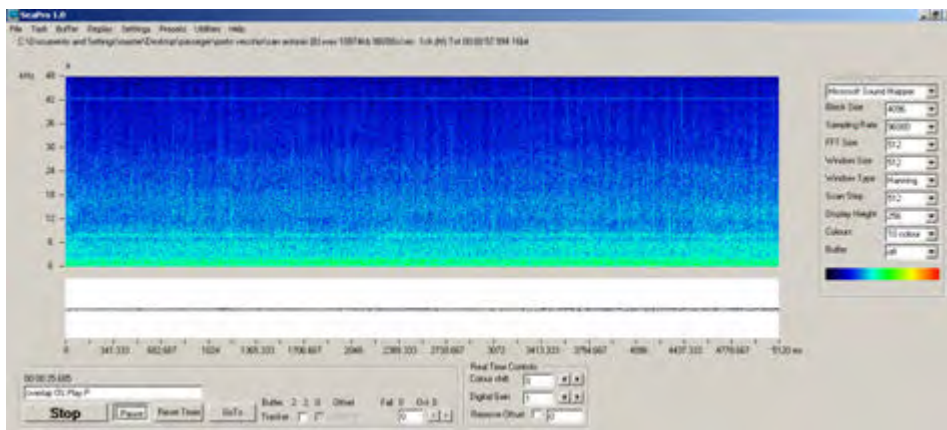


Illustration N.57. Spectrogramme : passage entre 50m et 100m de l'hydrophone

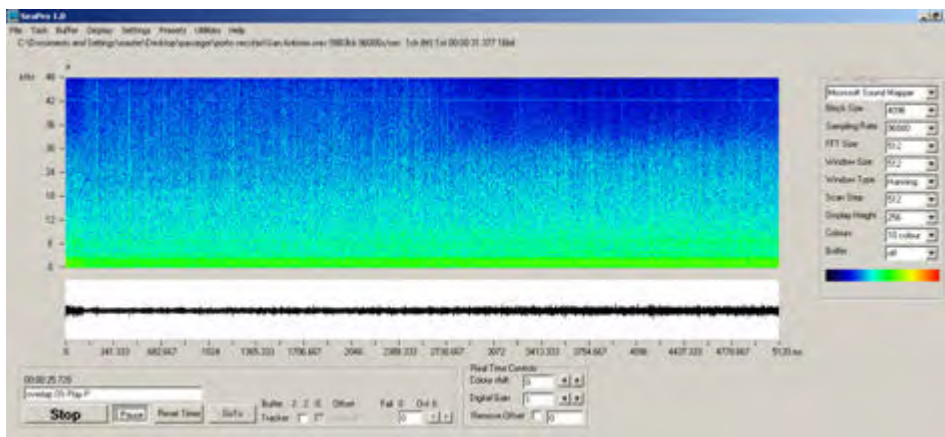


Illustration N.58. Spectrogramme : passage à moins de 50m de l'hydrophone

Moby line

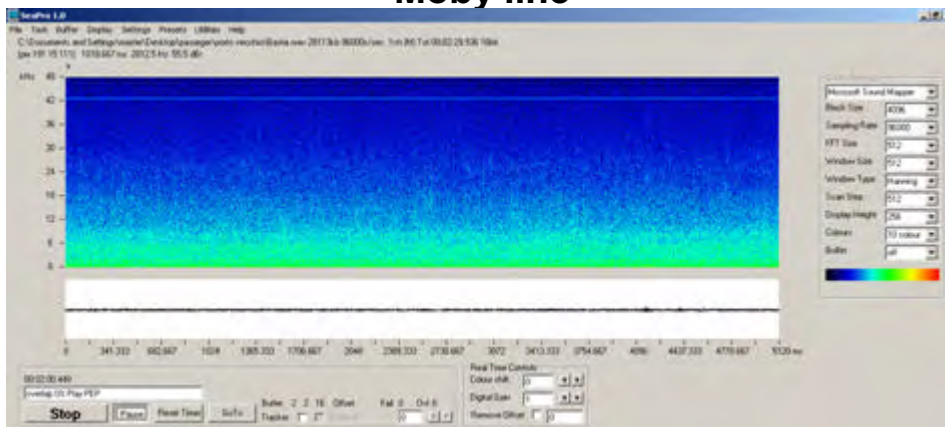


Illustration N.60. Spectrogramme : passage à moins de 50m de l'hydrophone

Saremar Ichnusa

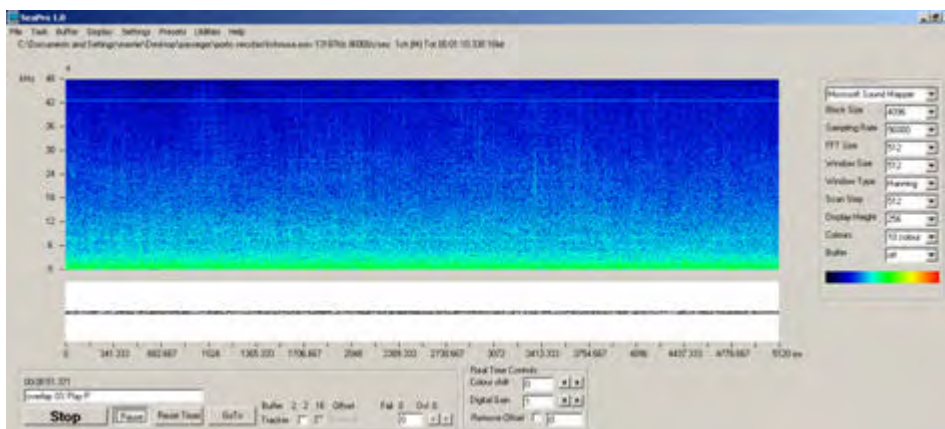


Illustration N.62. Spectrogramme : passage à moins de 50m de l'hydrophone

SIFFLEMENT DAUPHINS ET PASSAGE BATEAUX

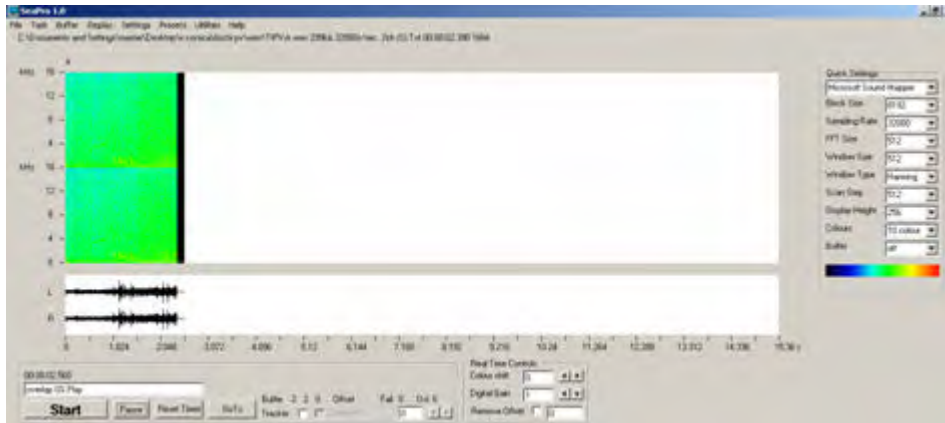


Illustration N.63. Spectrogramme : sifflements dauphins pendant le passage des plusieurs bateaux moteurs

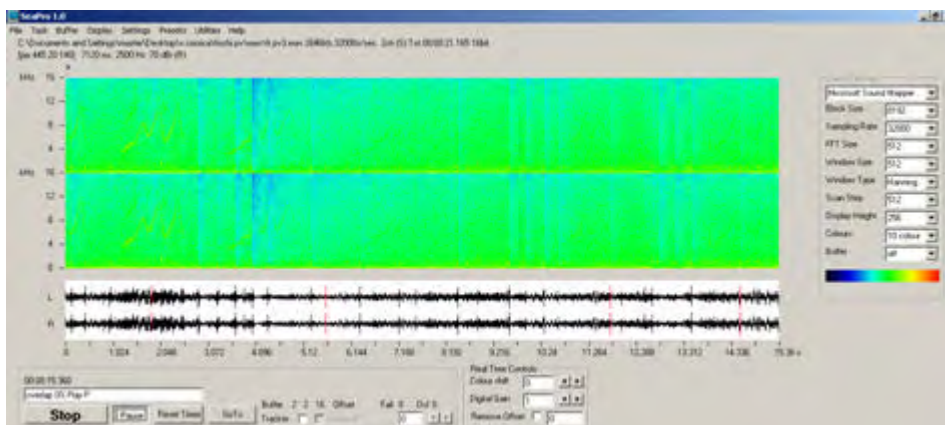


Illustration N.64. Spectrogramme : sifflements dauphins pendant le passage des plusieurs bateaux moteurs

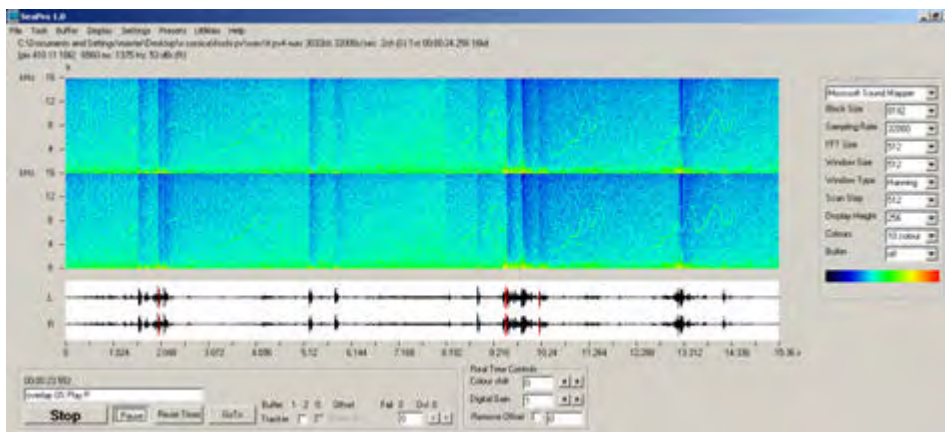


Illustration N.65. Spectrogramme : sifflements dauphins pendant le passage des plusieurs bateaux moteurs

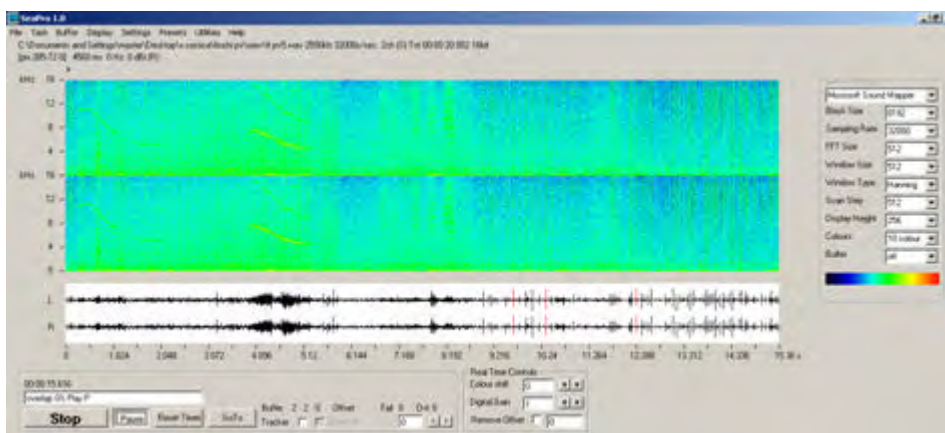


Illustration N.66. Spectrogramme : sifflements dauphins pendant le passage des plusieurs bateaux moteurs

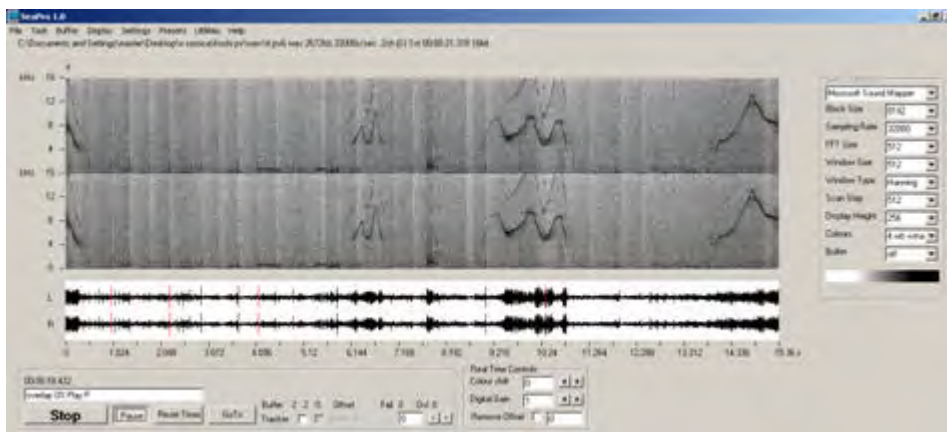


Illustration N.67. Spectrogramme : sifflements dauphins pendant le passage des plusieurs bateaux moteurs

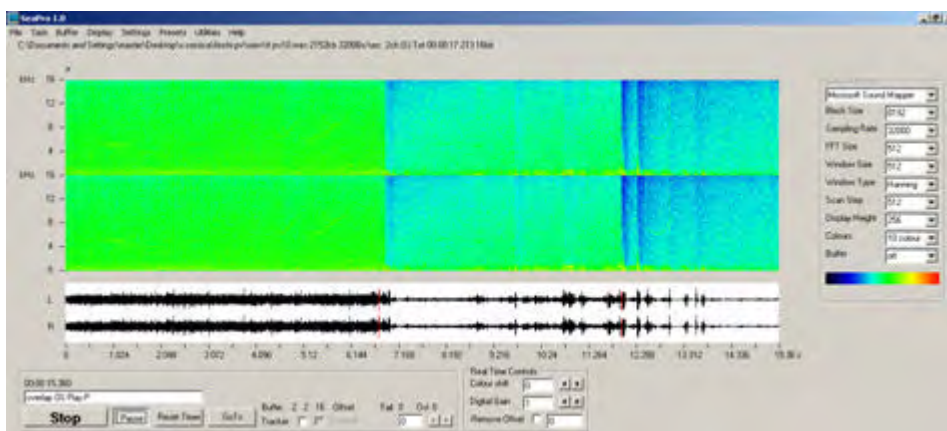


Illustration N.68. Spectrogramme : sifflements dauphins pendant le passage des plusieurs bateaux moteurs



Illustration N.69. Fédérica au travail dans la Réserve Naturelle de Scandola pendant le tournage du film.