

# L'acoustique passive pourrait-elle être une alternative aux observations visuelles pour l'estimation des densités de populations ?

## Principes et limites sur une espèce de mysticètes : la baleine bleue antarctique.

**Flore Samaran, Christophe Guinet**

Centre d'études biologiques de Chizé (CEBC)  
UPR CNRS 1934  
Villiers en Bois  
79360 Beauvoir sur Niort  
Tél.: 0549096111  
E-mail : cnps@u-psud.fr

**Rocio Prieto Gonzalez, Nadège Gandilhon, Olivier Adam**

Centre de neurosciences Paris Sud (CNPS)  
UMR CNRS 8195  
Université Paris Sud  
91405 Orsay Cedex  
E-mail : cnps@u-psud.fr

**Nadège Gandilhon, Max Louis**

Laboratoire de biologie marine EA926  
Université des Antilles et de la Guyane  
Campus de Fouillole

**Maria-Cruz Valsero,**

Dpt. Estadística e Investigación Operativa  
Facultad de Ciencias  
Universidad de Valladolid  
Valladolid, Espagne

### Résumé

*Mieux connaître les densités de population des cétacés est un des objectifs clés pour évaluer leur tendance et établir le statut de leur conservation des espèces et leur habitat. Il s'agit de renseigner le suivi des populations (croissance-stabilisation-décroissance) à court et moyen terme pour l'ensemble des mammifères marins, qu'ils soient résidents dans un lieu particulier ou non. Cette cartographie de la répartition mondiale des cétacés est dynamique (temporel et spatial) et nécessite, pour être efficace, l'analyse d'un nombre conséquent de données. La collecte de données sur les mammifères marins peut se faire à l'heure actuelle suivant 3 méthodes : les observations visuelles, le suivi télémétrique et les observations acoustiques. Actuellement, les estimations de densité de population sont basées uniquement sur les observations visuelles. Cet article vise à montrer comment les informations provenant de l'acoustique passive pourraient contribuer grandement au suivi des populations.*

**L**e recensement (occurrence et abondance) des espèces de mammifères marins est toujours d'actualité pour plusieurs raisons. Tout d'abord, la communauté internationale, via la Commission Baleinière Internationale ([www.iwcoffice.org](http://www.iwcoffice.org)), incite les chercheurs à faire remonter l'ensemble de leurs informations pour caractériser au plus juste la distribution et le suivi (évolution positive, nulle ou négative) des populations afin d'établir leur statut de conservation. Les politiques et gestionnaires sollicitent également les scientifiques à ce sujet (comme par exemple, lors de la création du prochain sanctuaire français aux Antilles). Il faut noter que, à ce jour, sur les 82 espèces de cétacés, certaines n'ont pas ce statut par manque de données concernant (voire la liste rouge des espèces menacées établie par l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (IUCN, <http://www.iucnredlist.org>). Deuxièmement, le suivi des populations des cétacés permet d'évaluer les interactions de ces mammifères avec les activités anthropiques, que ce soit au niveau du trafic maritime (collisions, nuisance sonore), des activités de pêches (captures accidentelles, problème de déprédation, impact du bruit, pingers, sonars), des énergies renouvelables (installation en mer de parc éoliens ou hydroliens), de la prospection et de l'exploitation pétrolières (levées sismiques, airguns, mise en place et utilisation des plateformes) et des activités

militaires (nuisances sonores, sonars, explosions). Dans tous les cas, il s'agit d'estimer les impacts directs (létaux ou non) et indirects (perturbations ou modifications de l'habitat ou des ressources alimentaires) sur les individus et les populations. Troisièmement, une thématique plus récente mobilise les chercheurs : les changements globaux liés au réchauffement climatique de la planète. Il s'agit de caractériser le plus précisément possible ce phénomène qui est maintenant clairement établi. L'objectif est d'affiner les modèles de prédiction pour les 10-20 ans à venir. Rappelons que à une augmentation de 1,5 à 2,5°C (resp. de l'ordre de 3,5°C) correspondrait un risque d'extinction de 20 à 30% (resp. de 40 à 70%) de la faune et de la flore de la planète [1]. Les scientifiques pensent que l'observation des cétacés peut contribuer à la définition d'indicateurs pertinents plus particulièrement en raison de leur position en début ou en fin de la chaîne alimentaire [2]. L'objectif est d'évaluer 1) les effets directs : si la température est un facteur important, cela va se traduire par la modification des distributions et la vulnérabilité des espèces (notamment celles résidentes) ; et 2) les effets indirects : changements dans l'habitat, variation de l'abondance et de la distribution des ressources, altération de l'état de santé (augmentation des risques de maladie/pathologie) et diminution de la capacité de reproduction.

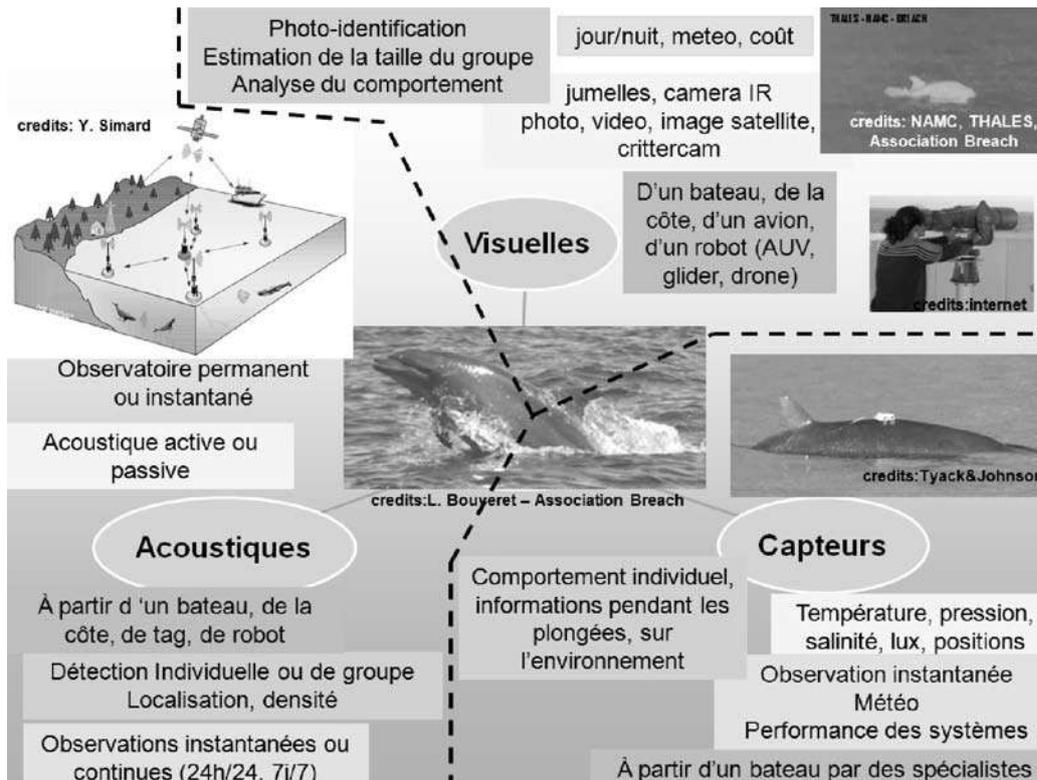


Fig. 1 : Méthodes d'observations des cétacés

Pour étudier les populations de mammifères marins, les méthodes d'investigation classiques sont basées sur les observations visuelles (estimation de la distribution, la démographie et la structure sociale de groupes spécifiques, des routes et périodes migratoires, des habitats privilégiés), mais on peut noter l'intérêt croissant de l'acoustique passive depuis plusieurs dizaines d'années pour l'étude de ces mammifères. Alors quelles sont les méthodes pour observer les cétacés ?

## Observations des cétacés

Ils existent 3 méthodes pour l'observation des cétacés dans leur milieu naturel : les observations visuelles, celles par télémétrie et celles par acoustique (Fig. 1). L'approche classique basée sur les observations visuelles des cétacés permet de renseigner sur la présence, la distribution et l'abondance des animaux selon leur habitat préférentiel. Elles peuvent être effectuées depuis la terre à partir de la côte, en mer ou par des systèmes de surveillance aériens (avions, satellites). Les limites de cette approche sont multiples et avant tout liées aux conditions de visibilité (de jour uniquement avec une météo et un état de mer nécessairement cléments) et à l'étendue de la zone de prospection : les campagnes d'observation en mer sont plus souvent côtières que pélagiques. De plus, pour être efficaces, elles doivent être effectuées régulièrement ce qui implique un coût important. Enfin, elles sont clairement dépendantes du comportement des cétacés. Or, la plupart des espèces passent globalement moins de 10% du temps en surface et certaines peuvent interagir

négativement avec la présence de bateau (cas de certaines baleines à bec, par exemple).

Les observations peuvent également être faites à partir des capteurs (température, pression, luminosité, Argos...) posés sur le mammifère marin. Ces instruments permettent de collecter des quantités importantes d'information sur l'individu (comportement, déplacements, interactions avec les autres s'il est en groupe) et son environnement. Les limites de cette approche sont principalement le fait que les informations sont obtenues sur peu d'individus (d'une part, les résultats obtenus sont-ils statistiquement valables et d'autre part, ces individus sont-ils représentatifs ?) et dépendent également des performances des matériels utilisés, ainsi que l'accessibilité des mammifères.

Enfin, l'acoustique est également un autre moyen d'observer les mammifères marins. Par le fait qu'ils sont acoustiquement actifs (émission de signaux sonores en quasi-permanence), il devient alors possible de les étudier grâce à des dispositifs basés sur l'acoustique passive, que ce soit pour des études instantanées (par exemple, au cours d'une campagne de mesures en mer limitée dans le temps) ou permanentes (via un réseau d'hydrophones autonomes ; [3] ; [4]). Les difficultés principales de cette approche sont liées d'une part à la grande diversité des sons émis par les différentes espèces et aussi d'un individu à l'autre et d'autre part aux conditions d'enregistrements (performance du matériel, fluctuations du bruit marin, propagation acoustique complexe et dépendante du milieu). Au sein d'une population, tous les cétacés ne vocalisent pas, et par conséquent, comme pour les approches précédentes (visuelles ou télémétrie), seule une partie de la population sera observée.

## Estimation de la densité de population

L'estimation des densités de population peut se faire soit en identifiant les individus soit en ayant recours à des méthodes statistiques basées sur des observations partielles de groupes.

### Les signatures individuelles

Il s'agit d'identifier des signes particuliers qui permettent de reconnaître formellement un individu. Lors d'observations visuelles, les chercheurs utilisent des marques spécifiques présentes de façon permanente sur le corps de l'animal (par exemple, comparaison des nageoires caudales des baleines à bosse) ; il s'agit de la photo-identification. Cette approche, coûteuse en temps et en énergie, est robuste et se fait principalement manuellement (il existe peu de logiciels de traitement d'images dédiés à l'archivage automatique des photos de baleines ; on peut toutefois citer : Finscan (<http://www.tamug.edu/mmrp/Software/Finscan/index.html>) ou le logiciel Darwin (<http://darwin.eckerd.edu>)).

Pour les observations acoustiques, il s'agit alors de rechercher les informations pertinentes dans les signaux sonores correspondant à une signature acoustique individuelle. Sur les cétacés, ce travail reste particulièrement délicat en 2010 pour plusieurs raisons : premièrement, la plupart des cétacés vivent en groupe et émettent des sons simultanément. Deuxièmement, il est difficile d'enregistrer à proximité un individu dans son milieu naturel. Troisièmement, il est nécessaire d'acquérir les sons le plus près possible des individus pour s'affranchir des déformations liées à la propagation acoustique. Quatrièmement, ce travail doit être fait dans un endroit le moins bruyant possible. Cinquièmement, il est nécessaire de coupler ces acquisitions sonores par des observations visuelles décrivant la scène (présence des cétacés, mouvements de l'individu ou du groupe, informations sur le comportement, caractérisation de l'environnement).

Ensuite, une fois les observations acquises, la méthode utilisée s'appelle Capture-Marquage-Recapture [5]. Il s'agit de dénombrer le nombre d'individus préalablement identifiés et non-identifiés au cours du temps. On a recours à l'estimateur de maximum de vraisemblance pour estimer la densité de population.

Cette méthode a été largement appliquée à partir des observations visuelles [6,7]. Il est intéressant de noter que cette technique est robuste autant pour des observations instantanées (c'est-à-dire pour estimer la taille d'un groupe de dauphins qui évoluent autour d'un bateau pendant un temps limité) ou permanentes (à partir d'observations faites sur le long terme). Pour les observations acoustiques, l'application de cette méthode nécessiterait la reconnaissance d'une signature individuelle, ce qui, à ce jour, reste un sujet ouvert, comme énoncé précédemment.

### Les méthodes statistiques

Il est possible de recourir à une méthode statistique lorsque les observations sont partielles, du fait qu'elles sont effectuées sur un espace limité de la zone que l'on veut couvrir et pendant une durée limitée. Appelée Distance Sampling

[8,9], cette méthode vise à estimer un nombre d'individus sans avoir à les identifier ; il est donc possible de comptabiliser le même individu à différentes reprises.

$$\text{On a : } \bar{D} = \frac{C}{a}$$

où C est le nombre d'individus observés sur l'aire visitée a. On donnera une estimation de densité sur l'aire totale A que l'on souhaite caractérisée par :

$$\hat{N} = \hat{D} \times A$$

A partir de n observations visuelles, on écrit :

$$\bar{D} = \frac{n}{a\hat{P}}$$

Il n'y a plus la contrainte de détecter de façon exhaustive tous les individus présents ; pour cela, on rajoute  $\hat{P}$  l'estimation de la probabilité de détecter un individu sachant sa distance. Les distances d'observation sont les indices de détectabilité, avec les 2 hypothèses suivantes. D'une part, les cétacés qui sont devant l'observateur sont détectés à coup sûr et d'autre part, les cétacés qui sont à une distance infinie de l'observateur ne sont pas détectés. On voit bien que l'histogramme des observations (mammifères détectés) va donc être décroissant en fonction de la distance, jusqu'à s'annuler à une distance maximale qui dépend de l'espèce (certaines sont plus furtives en surface que d'autre), de la visibilité, de la hauteur de la plateforme d'observation et de la performance de l'observateur (aidé éventuellement avec des jumelles).

Peut-on décliner la méthode Distance Sampling à des observations acoustiques ? Récemment, Marques et al. [10] proposent une adaptation de l'équation :

$$\bar{D} = \frac{n_c(1 - \hat{\epsilon})}{K\pi w^2 \hat{P} T f}$$

où  $n_c$  est le nombre de sons détectés, l'estimation des faux négatifs (un son a été comptabilisé alors qu'il n'a pas été émis par l'espèce de cétacés observée), K le nombre d'hydrophone,  $\pi w^2$  l'aire autour de l'hydrophone dans laquelle un son émis par un cétacé peut être détecté, T la durée de l'enregistrement et  $f$  l'estimation du nombre d'émissions sonores qu'un cétacé peut émettre par seconde.

Les remarques sont les suivantes. Premièrement, le nombre de détections dépend de la nature des sons émis par les cétacés observés, des caractéristiques de la propagation acoustique, des performances de la chaîne d'acquisition (sensibilité de l'hydrophone, bruit), de la méthode de détection utilisée (méthode et seuil ; il y aura ainsi des différences notables entre le recours à un détecteur sur énergie ou un filtre adapté ou tout autre méthode). Deuxièmement, K correspond aux hydrophones qui enregistrent en continu pendant la même durée T. Troisièmement, le taux d'émissions sonores dépend de l'espèce voire de l'individu. Quatrièmement, on fait l'hypothèse que la légitimité de recourir à des méthodes statistiques est comparable entre le nombre d'individus détectés visuellement ou acoustiquement par rapport au nombre d'individus présents. Pour cela, on devra considérer un nombre de détections suffisamment grand.

## Application : recensement des baleines bleues antarctiques

La population des baleines bleues antarctiques, *Balaenoptera musculus intermedia* (B<sub>Mi</sub>), présentes dans l'hémisphère sud, a été anéantie au siècle dernier par la chasse commerciale ; plus de 99% des individus ont été chassés en quelques décennies [11]. Actuellement, la population est protégée de toute chasse commerciale mais le nombre d'individus restant est mal évalué en raison de la difficulté d'effectuer des relevés visuels efficaces à ces latitudes. La méthode alternative pour leur observation est le recours à l'acoustique passive du fait que ces animaux sont acoustiquement actifs la plupart du temps et durant toute l'année. Les baleines bleues antarctiques émettent des sons stéréotypés, précédemment caractérisés dans les eaux indiennes et antarctiques [12,13], dans les basses fréquences avec une très forte intensité assurant une propagation sur de grandes distances [14].

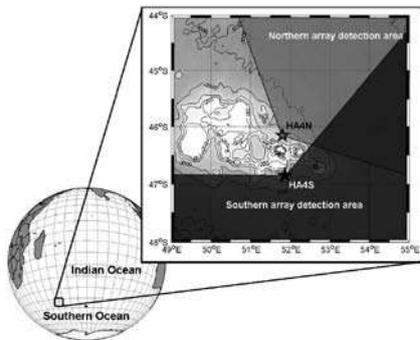


Fig. 2 : Localisation des hydrophones du SSI de Crozet – réseau d'hydrophones au nord et au sud

En collaboration avec le Commissariat à l'Energie Atomique (CEA, [www.cea.fr](http://www.cea.fr)), nous avons analysé et traité une année d'enregistrements provenant d'une des stations hydroacoustiques du Système de Surveillance Internationale (SSI) mise en place du Traité d'Interdiction Complète des Essais Nucléaires (TICE, <http://www.ctbto.org>) [15]. Ces hydrophones sont disposés au nord et au sud de l'archipel de Crozet (Terres Australes et Antarctiques Françaises) (Fig. 2).

Les sons émis par ces mammifères marins ont certaines caractéristiques que nous avons modélisées afin de proposer plusieurs templates pour effectuer une détection automatique [16] (Fig. 3). Le fait qu'un individu soit passé à proximité des hydrophones (< 1km) nous a permis de préciser l'intensité acoustique :  $179 \pm 5$  dB re  $1 \mu\text{Pa}$  à 1m [17]. Dans toute la base de données, notre détecteur automatique a permis d'extraire 172 947 cris répartis tout au long de l'année, montrant ainsi que ces cétacés restent dans la zone subantarctique (Fig. 4).

$$|p|_{B_{Mi}}[k] = 10.9 \times e^{-\left(\frac{k-2378}{372.4}\right)^2} \times \sin(2\pi f_1 k) + \left( 0.4648 \times e^{-\left(\frac{k-2288}{420}\right)^2} + 2.659 \times e^{-\left(\frac{k-3353}{148.5}\right)^2} + 2.265 \times e^{-\left(\frac{k-3070}{169.4}\right)^2} + 1.081 \times e^{-\left(\frac{k-3730}{261.2}\right)^2} \right) \times \sin(2\pi f_2 k)$$

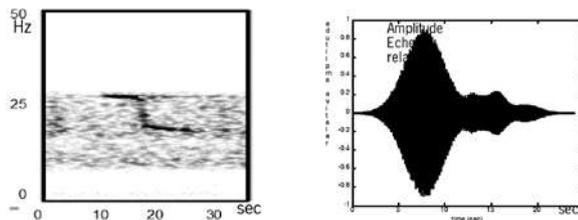


Fig. 3 : a) spectrogramme d'un cri de baleine bleue antarctique ; b) signal temporel d'un template

A chaque cri, nous avons estimé la distance de l'individu à l'hydrophone en utilisant le modèle de propagation acoustique *Range dependent Acoustic Model* (RAM) [18]. Le modèle RAM est particulièrement adapté à notre étude pour au moins 2 raisons. D'une part, les sons émis par les baleines bleues antarctiques présentent des parties pratiquement mono fréquentielle et à très basses fréquences (Fig. 3). D'autre part, il est possible de décrire les différents paramètres liés à la propagation au niveau spatial autour de Crozet (bathymétrie, température, salinité) et au niveau temporel (mois/mois).

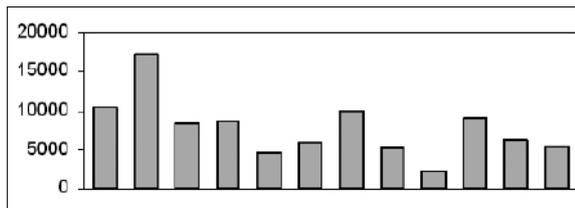


Fig. 4 : Nombre de cris détectés par mois

Le modèle RAM nous a alors permis d'évaluer les pertes de propagation et d'en déduire une estimation de la distance à laquelle se trouvait chaque individu lorsqu'il a émis sa vocalise. Ce travail a permis de déterminer la zone de détection des baleines bleues antarctiques couvertes par les hydrophones dans nos conditions de détection [19].

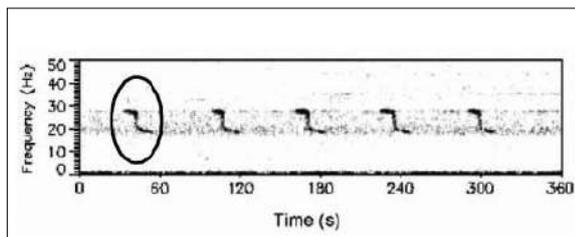


Fig. 5 : Séquence de cris émis par un individu

Revenons à l'équation 4 pour voir comment il est possible de l'appliquer dans le cadre de cette étude. Plaçons-nous avec les résultats issus d'un seul hydrophone (K=1). Premièrement, nous avons utilisé un seuil de détection particulièrement haut afin de s'assurer qu'une détection correspond bien à un son de B<sub>Mi</sub> [15] ;

nous avons ainsi minimisé les fausses détections. Deuxièmement, l'aire de détection couverte est déduite d'une part de la distance maximale estimée par le modèle RAM (différente en fonction du mois) et d'autre part en tenant compte du masquage acoustique dû à la bathymétrie particulière autour de Crozet [20] (Fig. 2). Troisièmement, l'histogramme des cris détectés en fonction des distances va servir pour préciser la probabilité de détection  $\bar{P}$ . Quatrièmement, il est nécessaire d'estimer le nombre de cris émis par unité de temps pour cette espèce de cétacés. Ce dernier paramètre est particulièrement délicat à établir et cela pour toutes les espèces de cétacés en général. Marques et al. [10] propose de recourir à une balise munie d'un hydrophone que l'on dépose sur le dos de l'animal et qui permet de l'enregistrer plusieurs heures pour pouvoir faire une estimation robuste de  $\bar{r}$ . Il est cependant impossible de suivre cette approche dans notre cas. Nous avons procédé autrement, en remarquant dans les enregistrements, des séquences de cris (Fig. 5). Ces répétitions de sons sont interrompues par des périodes de silence plus longues. Il est alors possible de caractériser ces séquences et de définir un nombre de séquences par unité de temps. Malheureusement, il y a plusieurs difficultés à cette démarche. Tout d'abord, il n'est pas sûr que ces séquences soient les mêmes pour tous les individus, elles peuvent dépendre de l'âge, du comportement et peut-être même du sexe. On n'est d'ailleurs actuellement pas certains que les femelles baleines bleues émettent ces sons [21]. Et des variations même faibles de ce paramètre entraînent des différences significatives dans les estimations du nombre d'individus. On peut s'affranchir de ces difficultés en proposant une solution alternative consistant à considérer les données comme une série temporelle. Tenant compte que d'une part, un cétacé émet des sons de façon répétitive et que d'autre part, certains individus seront silencieux pendant la période d'enregistrement, nous avons introduit un processus de Poisson à 2 paramètres, l'un spatial et l'autre temporel. Après calculs de sa distribution et de sa fonction de vraisemblance pour obtenir les estimations de ces 2 paramètres, on en déduit le nombre de cris par individu et par conséquent la densité de population.

## Conclusion

Connaître le nombre d'individus dans une population de mammifères marins présents dans une zone est un élément important pour faire du suivi de l'espèce, mais également pour renseigner sur son environnement et sur les possibles impacts des activités humaines. Il existe des méthodes robustes basées sur les observations visuelles et l'enjeu actuel est de savoir s'il est possible de les décliner aux observations acoustiques, qui peuvent être soit complémentaires aux observations visuelles, soit les seules possibles, comme ce fut le cas dans l'application que nous avons détaillée. Toutefois, il reste encore quelques difficultés, notamment l'estimation du nombre de cris émis par unité de temps défini et par un individu. Les perspectives seront donc soit de proposer des techniques dédiées à certaines espèces, soit de proposer des méthodes statistiques alternatives qui permettront, à partir de simulations, de donner une estimation plus fine de ce taux.

## Remerciements

Ce travail a été financé notamment par l'association Breach ([www.breach-asso.org](http://www.breach-asso.org), France), l'association DIRAC (France), le Commissariat à l'énergie atomique ([www.cea.fr](http://www.cea.fr)) et le Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer (<http://www.developpement-durable.gouv.fr>).

## Références bibliographiques

- [1] IPCC. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- [2] Simmonds M.P. and Elliott W.J. (2009). Climate change and cetaceans: concerns and recent developments, *J. of the Mar. Biol. Assoc. of the United Kingdom*, 89(1), 203-210
- [3] Mellinger, D. K., Niekirk, S. L., Matsumoto, H., Heimlich, S. L., Dziak, R. P., Haxel, J., Fowler, M., Meinig, C., and Miller, H.V. (2007). Seasonal occurrence of North Atlantic right whale (*Eubalaena glacialis*) vocalizations at two sites on the scotian shelf. *Mar. Mamm. Sci.* 23(4), 856-867
- [4] Gandillon, N., Adam, O., and Louis, M. (2010). Using passive acoustics for marine mammal observations: multidisciplinary observatories, materials and software, *International Review of Physics*, 4(1), p. 20-28 (A paraître)
- [5] Seber, G. A. F. 1982. *The estimation of animal abundance and related parameters*. 2nd edition, Griffin, London
- [6] Hammond P. S. (1986). Estimating the size of naturally marked whale populations using capture-recapture techniques, *Rep. of the International Whaling Commission*, 8:252-282.
- [7] Barlow, J., and Forney, K.A. (2007) Abundance and population density of cetaceans in the California Current ecosystem, *Fishery Bulletin*, 105:509-526
- [8] Buckland, S.T., Burnham, K. P., Anderson, D.R. and Laake, J.L. (1993). *Density estimation using Distance Sampling*. London: Chapman and Hall.
- [9] Buckland, S.T., Anderson, D.R., Burnham, K. P., Laake, J.L., Borchers, D.L. and Thomas, L. (2004). *Advanced Distance Sampling. Estimating abundance of biological populations*. Oxford University Press. Oxford, UK
- [10] Marques, T.A., Thomas, L, Ward, J., DiMarzio, N. and Tyack, P.L. (2009), Estimating cetacean population density using fixed passive acoustic sensors: An example with Blainville's beaked whales, *J. Acoust. Soc. Am.*, 125(4): 1982-1994
- [11] Clapham, P.J., Young, S.B., and Brownell, JrRL. (1999). Baleen whales: conservation issues and the status of the most endangered populations. *Mammal Rev*, 29:35-60
- [12] Ljungblad, D.K., Clark, C.W., Shimada, H. (1998). A comparison of sounds attributed to pygmy blue whales (*Balaenoptera musculus brevicauda*) recorded south of the Madagascar Plateau and those attributed to 'true' blue whales (*Balaenoptera musculus*) recorded off Antarctica, *Rep Int Whal Commiss.* 48:439-442
- [13] Rankin, S., Ljungblad, D., Clark, C., and Kato, H. (2005). Vocalisations of Antarctic blue whales, *Balaenoptera musculus intermedia*, recorded during the 2001/2002 and 2002/2003 IWC/SOWER circumpolar cruises, Area V, Antarctica. *J Cetacean Res Mngmt*. 7:13-20
- [14] Stafford, K.M., Mellinger, D.K., Moore, S.E., and Fox, C.G. (2007). Seasonal variability and detection range modeling of baleen whale calls in the Gulf of Alaska, 1999-2002. *J Acoust Soc Am*. 122:3378-3390
- [15] Samaran, F., Adam, O., Motsch, J.-F., and Guinet C. (2008). Definition of the Antarctic and Pygmy Blue whale call templates. Application to fast automatic detection. *Can Acoust*. 36:93-102
- [16] Samaran, F., Adam, O., Guinet, C., Motsch, J.F. And Cansi, Y. (à paraître). Source level estimation of two blue whale subspecies in Southwestern Indian Ocean, *J. Acoust. Soc. Am*.
- [17] Samaran, F. (2008). *Analyse des signaux acoustiques d'origine biologique enregistrés dans l'Océan Indien : Implication dans le recensement et le suivi des mouvements saisonniers des cétacés*. PhD thesis, University of La Rochelle, France
- [18] Collins, MD (1993). A split-step Padé solution for the parabolic equation method. *J. Acoust. Soc. Am*. 93:1736-1742 (<http://oalib.hlsresearch.com>).
- [19] Samaran, F., Adam, O., and Guinet, C. (à paraître). Detection range modelling of blue whale calls in the Southwestern Indian Ocean. *Applied Acoustics*.
- [20] Samaran, F., Adam, O., and Guinet, C. (à paraître). Discovery of a mid-ocean sympatric of southern blue whale subspecies. *Endangered species research*
- [21] Oleson EM, Calambokidis J, Burgess WC, McDonald MA, LeDuc CA, Hildebrand JA. (2007). Behavioral context of call production by eastern North Pacific blue whales. *Mar Ecol Prog Ser*. 330:269-284
- [22] McDonald, Hildebrand and Mesnick (2009). Worldwide decline in tonal frequencies of blue whale songs, *Endangered species research*, 9:13-21