



Pêches et Océans
Canada

Fisheries and Oceans
Canada

Sciences des écosystèmes
et des océans

Ecosystems and
Oceans Science

Secrétariat canadien des avis scientifiques (SCAS)

Document de recherche 2023/050

Région de Terre-Neuve-et-Labrador

Examen préliminaire de l'efficacité de plusieurs algorithmes de détection acoustique automatique des vocalises de baleine noire de l'Atlantique Nord, et recommandations par rapport aux prochaines étapes relatives à l'évaluation et à l'optimisation de ces algorithmes

Jack W. Lawson¹

¹ Pêches et Océans Canada
Centre des pêches de l'Atlantique Nord-Ouest
80 rue East White Hills, CP 5667
St. John's (T.-N.-L.) A1C 5X1

Avant-propos

La présente série documente les fondements scientifiques des évaluations des ressources et des écosystèmes aquatiques du Canada. Elle traite des problèmes courants selon des échéanciers dictés. Les documents qu'elle contient ne doivent pas être considérés comme des énoncés définitifs sur les sujets traités, mais plutôt comme des rapports d'étape sur les études en cours.

Publié par :

Pêches et Océans Canada
Secrétariat canadien des avis scientifiques
200, rue Kent
Ottawa (Ontario) K1A 0E6

<http://www.dfo-mpo.gc.ca/csas-sccs/>
csas-sccs@dfo-mpo.gc.ca



© Sa Majesté le Roi du chef du Canada, représenté par le ministre du
ministère des Pêches et des Océans, 2023

ISSN 2292-4272

ISBN 978-0-660-49013-7 N° cat. Fs70-5/2023-050F-PDF

La présente publication doit être citée comme suit :

Lawson, J. 2023. Examen préliminaire de l'efficacité de plusieurs algorithmes de détection acoustique automatique des vocalises de baleine noire de l'Atlantique Nord, et recommandations par rapport aux prochaines étapes relatives à l'évaluation et à l'optimisation de ces algorithmes. Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc. de rech. 2023/050. iv + 20 p.

Also available in English :

Lawson, J. 2023. A preliminary review of the efficacy of several acoustic autodetection algorithms to identify North Atlantic right whale calls, and recommendations for next steps to further assess and optimize these algorithms. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2023/050. iv + 17 p.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	iv
INTRODUCTION.....	1
MÉTHODES.....	1
DÉTECTEURS ACOUSTIQUES AUTOMATISÉS DES VOCALISES DE CONTACT À MODULATION ASCENDANTE ÉMISES PAR LA BALEINE NOIRE DE L'ATLANTIQUE NORD.....	1
TERMINOLOGIE POUR DÉCRIRE ET COMPARER LES DÉTECTEURS.....	2
RÉSULTATS.....	3
COMPARAISON, EN 2010, DES PREMIERS DÉTECTEURS DES VOCALISES DE CONTACT À MODULATION ASCENDANTE ÉMISES PAR LA BALEINE NOIRE DE L'ATLANTIQUE NORD PAR APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE.....	3
COMPARAISON, EN 2013, DE DÉTECTEURS AUTOMATIQUES DES VOCALISES DE CONTACT À MODULATION ASCENDANTE ÉMISES PAR LA BALEINE NOIRE DE L'ATLANTIQUE NORD.....	3
DÉTECTEUR LFDCA DE BAUMGARTNER.....	4
DÉTECTEUR SPECTROPLOTTER DE JASCO.....	5
COMPARAISON, EN 2017, DES DÉTECTEURS LFDCA ET JASCO POUR LES VOCALISES DE CONTACT À MODULATION ASCENDANTE ÉMISES PAR LA BALEINE NOIRE DE L'ATLANTIQUE NORD.....	5
DISCUSSION.....	7
LES SDC DONNENT DES RÉSULTATS « ACCEPTABLES » CONCERNANT LES DONNÉES CONTENANT DES VOCALISES DE CONTACT À MODULATION ASCENDANTE DE BALEINE NOIRE DE L'ATLANTIQUE NORD.....	7
LE CONTEXTE DES VOCALISES DE CONTACT À MODULATION ASCENDANTE EST UN FACTEUR IMPORTANT EN CE QUI CONCERNE L'EFFICACITÉ DES SDC	7
DE BONS ÉCHANTILLONS DE VOCALISES DE CONTACT À MODULATION ASCENDANTE ET DES ENSEMBLES DE DONNÉES VALIDÉS MANUELLEMENT SONT ESSENTIELS POUR TESTER LES SDC.....	8
RECHERCHE FUTURE.....	8
COMPARAISON ET OPTIMISATION DES SDC – VALIDATION MANUELLE.....	9
COMPARAISON ET OPTIMISATION DES SDC – TRAITEMENT PAR LES DÉTECTEURS.....	9
COMPARAISON ET OPTIMISATION DES SDC – ATELIER INTERNATIONAL.....	10
CONCLUSIONS.....	10
REMERCIEMENTS.....	11
RÉFÉRENCES CITÉES.....	11
TABLEAUX ET FIGURES.....	14

RÉSUMÉ

La détection et la classification automatisées des vocalises de baleine noire de l'Atlantique Nord et d'autres mammifères marins sont hautement souhaitables pour les chercheurs et les gestionnaires qui cherchent à surveiller leur présence dans certaines zones afin de mettre en œuvre des mesures d'atténuation. Ce type de traitement acoustique automatisé est particulièrement important pour les approches de surveillance en temps réel qui traitent de grandes quantités de données acoustiques.

Tous les systèmes de détection et de classification (SDC) utilisés par Pêches et Océans Canada (MPO) doivent offrir des résultats similaires, compte tenu des données (p. ex., heures avec vocalise/jour) utilisées pour présenter les occurrences de baleine noire de l'Atlantique Nord dans le temps, ce qui a déjà été démontré en comparant l'efficacité de divers détecteurs lors d'études menées en 2004, 2013 et 2017. Le Spectroplotter (un programme commercial) et le système de détection et de classification des basses fréquences (LFDCS, pour Low Frequency Detection and Classification System), deux systèmes ayant été utilisés pour analyser les données acoustiques dans la région de Terre-Neuve-et-Labrador et la région des Maritimes, donnent de bons résultats, bien que dans une petite étude, le LFDCS ait détecté plus de véritables vocalises de contact à modulation ascendante de baleine noire de l'Atlantique Nord que le Spectroplotter, mais ait également généré plus de faux positifs.

L'efficacité d'un SDC est influencée par de multiples facteurs, y compris les niveaux de bruit ambiant par rapport aux caractéristiques de la vocalise de contact à modulation ascendante de la baleine noire de l'Atlantique Nord, l'emplacement de l'hydrophone, les caractéristiques du système d'enregistrement, les réglages et les seuils du logiciel, et d'autres caractéristiques contextuelles, comme la présence d'autres espèces. La prochaine génération de SDC intégrera le contexte dans sa logique (p. ex., la présence d'autres mammifères marins ou de sources sonores abiotiques et le rapport signal sur bruit).

Les comparaisons d'algorithmes sont moins importantes dans les analyses historiques de la baleine noire de l'Atlantique Nord puisque les données qui découlent des résultats de détection actuels sont présentées à une échelle suffisamment grande (« Une baleine noire de l'Atlantique Nord a-t-elle été détectée à proximité de cet enregistreur aujourd'hui »?) pour que les légères différences en matière d'efficacité des algorithmes ne soient pas perceptibles après le processus d'amalgamation et de cumul.

À des échelles d'échantillonnage spatiales et temporelles plus petites, les différences en matière d'efficacité des algorithmes deviennent plus visibles. Un test complet des différents SDC utilisés au Canada atlantique nécessiterait une série d'ensembles de données acoustiques validées manuellement et provenant d'un ensemble représentatif de lieux, de périodes, de saisons et de matériel d'enregistrement. Comparer ainsi les SDC serait une activité utile, mais nécessiterait que des mesures et des seuils de rendement soient établis pour ceux-ci.

INTRODUCTION

La surveillance acoustique passive (SAP) est un outil puissant pour détecter et identifier les mammifères marins sous l'eau, et elle a été utilisée dans de nombreuses études (Baumgartner *et al.* 2018; Mellinger *et al.* 2007a; Van Parijs *et al.* 2009; Verfuß *et al.* 2007). Contrairement aux relevés visuels, la SAP permet de recueillir des données en continu, dans des endroits éloignés et dans des conditions de luminosité et des conditions météorologiques qui limiteraient la détection visuelle. Cependant, la SAP peut produire une grande quantité de données composées d'un mélange complexe de sons de l'espèce d'intérêt, d'autres espèces, d'activités anthropiques et de processus environnementaux. Il est donc nécessaire de disposer d'une méthode permettant d'analyser rapidement ces données.

Heureusement, de nombreuses espèces marines produisent des sons qui leur sont uniques. Par exemple, la baleine noire de l'Atlantique Nord (*Eubalaena glacialis*) a un répertoire de vocalises distinctives, notamment une vocalise de contact à modulation ascendante de 50 à 300 Hz (figure 1a; Mellinger *et al.* 2007b). Afin de détecter les sons propres à l'espèce, s'il est d'une précision acceptable, un SDC automatisé prend beaucoup moins de temps pour traiter de grandes quantités de données d'enregistrement acoustique qu'un expert formé procédant à une validation manuelle. En particulier, la détection et la classification automatisées et précises des vocalises de baleine noire de l'Atlantique Nord et d'autres mammifères marins sont hautement souhaitables pour les chercheurs et les gestionnaires qui cherchent à surveiller la présence de baleines dans certaines zones afin de mettre en œuvre des mesures d'atténuation.

Une variété d'approches quant aux SDC ont été conçues pour détecter les sons de mammifères marins, y compris des détecteurs de basse fréquence pour la baleine noire de l'Atlantique Nord (voir Davis *et al.* 2017) [tableau 1]. Ces détecteurs sont particulièrement pertinents dans le cadre des efforts de surveillance et d'atténuation du MPO concernant cette espèce au Canada atlantique, car divers algorithmes de détection et de classification sont actuellement utilisés; cependant, l'efficacité et la précision de ces détecteurs semblent varier. Il est donc préférable de les comparer pour s'assurer que le MPO utilise un système offrant la meilleure précision et la meilleure vitesse d'analyse.

En plus d'examiner les SDC existants, je formule des recommandations au Ministère sur la façon dont nous pourrions comparer davantage ces détecteurs et comment mieux allouer les ressources pour optimiser ces systèmes.

MÉTHODES

DÉTECTEURS ACOUSTIQUES AUTOMATISÉS DES VOCALISES DE CONTACT À MODULATION ASCENDANTE ÉMISES PAR LA BALEINE NOIRE DE L'ATLANTIQUE NORD

Ces dernières années, divers détecteurs-classificateurs automatiques ont été conçus pour la baleine noire de l'Atlantique Nord (Baumgartner et Mussoline 2011; Dugan *et al.* 2010a; Gillespie 2004; Mellinger 2004; Mouy *et al.* 2009; Simard et Roy 2008; Urazghildiiev et Clark 2006), y compris des combinaisons de détecteurs (Dugan *et al.* 2010b). Nombre de ces détecteurs sont destinés à cibler les sons tonals, tels que la vocalise de contact à modulation ascendante de la baleine noire de l'Atlantique Nord, plutôt que les signaux à large bande tels que les sons de type « coup de feu » que la baleine noire de l'Atlantique Nord produit également. Certains SDC classent les signaux en fonction de mesures directes de caractéristiques telles que leur fréquence et leur durée (p. ex., l'algorithme de JASCO [Spectroplotter]; figure 1b), tandis que d'autres classent les signaux en fonction de mesures

dérivées de leurs caractéristiques de base (p. ex., l'algorithme du LFDCS; Baumgartner et Mussoline 2011).

TERMINOLOGIE POUR DÉCRIRE ET COMPARER LES DÉTECTEURS

Il faut établir une terminologie et des paramètres pour quantifier les différences d'efficacité entre les détecteurs de vocalises de baleine noire de l'Atlantique Nord et la validation manuelle (le processus selon lequel un analyste hautement qualifié examine les enregistrements acoustiques de façon auditive et visuelle pour classer les signaux qu'ils contiennent).

Vrai positif : vocalise classée comme ayant été émise par une baleine noire de l'Atlantique Nord et qui est effectivement une vocalise de l'espèce selon la validation manuelle.

Faux positif : vocalise classée comme ayant été émise par une baleine noire de l'Atlantique Nord, mais qui n'est pas une vocalise de l'espèce selon la validation manuelle.

Vrai négatif : vocalise classée comme n'ayant pas été émise par une baleine noire de l'Atlantique Nord et qui n'est effectivement pas une vocalise de l'espèce selon la validation manuelle.

Faux négatif : vocalise classée comme n'ayant pas été émise par une baleine noire de l'Atlantique Nord, mais qui est une vocalise de l'espèce selon la validation manuelle.

Rappel : (également appelé sensibilité) : capacité d'un algorithme de classification (détecteur) à reconnaître toutes les véritables vocalises de baleine noire de l'Atlantique Nord.

Précision : capacité d'un algorithme de classification à ne renvoyer que des détections correctes de vocalises de baleine noire de l'Atlantique Nord.

Alors que le rappel exprime la capacité à détecter toutes les vocalises de baleine noire de l'Atlantique Nord dans un ensemble de données, la précision exprime la proportion des vocalises que l'algorithme de détection classe correctement comme ayant été émis par une baleine noire de l'Atlantique Nord.

$$\text{Recall} = \frac{\text{True Upcalls}}{\text{True Upcalls} + \text{False Negatives}}$$

$$\text{Precision} = \frac{\text{True Upcalls}}{\text{True Upcalls} + \text{False Positives}}$$

Mesure F1 : un paramètre unique qui combine le rappel et la précision à l'aide de la moyenne harmonique. La mesure F1 est plus appropriée pour obtenir un équilibre entre la précision et le rappel en cas de distribution déséquilibrée des classes. Une distribution déséquilibrée des classes est un scénario dans lequel le nombre d'occurrences d'un type de vocalises (comme celles de la baleine noire de l'Atlantique Nord) est beaucoup plus faible que les occurrences d'autres types de vocalises (comme celles de la baleine à bosse [Megaptera novaeangliae]).

$$F1 = 2 \times \frac{\text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}}$$

Courbe caractéristique de la performance d'un test (courbe ROC) : tracé du taux de vrais positifs par rapport au taux de faux positifs comme fonction du seuil de l'algorithme de classification pour classer correctement une vocalise de baleine noire de l'Atlantique Nord. La courbe ROC montre comment la relation entre rappel et précision change en fonction des

modifications du seuil d'identification d'une véritable vocalise de baleine noire de l'Atlantique Nord. Modifier le seuil permet d'obtenir un équilibre acceptable entre la précision et le rappel.

Aire sous la courbe (ASC) : mesure permettant de calculer l'efficacité globale d'un algorithme de classification en fonction de l'aire sous la courbe ROC.

RÉSULTATS

COMPARAISON, EN 2010, DES PREMIERS DÉTECTEURS DES VOCALISES DE CONTACT À MODULATION ASCENDANTE ÉMISES PAR LA BALEINE NOIRE DE L'ATLANTIQUE NORD PAR APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE

Dugan et ses collaborateurs (2010b) ont comparé trois des premières approches informatiques pour reconnaître les vocalises de contact à modulation ascendante émises par la baleine noire de l'Atlantique Nord. L'efficacité de deux approches plus récentes (algorithmes d'apprentissage automatique basés soit sur des réseaux neuronaux artificiels [NET], soit sur des classificateurs à arbre de classification et de régression [CART]) a été comparée à celle d'un système antérieur qui utilisait une approche de test de vecteurs de caractéristiques (FVT) en plusieurs étapes. Les chercheurs ont utilisé un large échantillon de bruits sous-marins et d'événements de vocalise de contact à modulation ascendante de baleine noire de l'Atlantique Nord enregistrés dans la baie du Cap-Cod et dans le Grand chenal Sud. Parmi les trois classificateurs, l'algorithme CART a obtenu la précision la plus élevée, soit 86 %, avec les mêmes taux de faux positifs que l'algorithme NET. L'algorithme FVT n'a pas été aussi performant que les méthodes plus récentes pour classer les vocalises de contact à modulation ascendante de baleine noire de l'Atlantique Nord (rappel plus faible), mais a présenté un taux de faux positifs très faible.

COMPARAISON, EN 2013, DE DÉTECTEURS AUTOMATIQUES DES VOCALISES DE CONTACT À MODULATION ASCENDANTE ÉMISES PAR LA BALEINE NOIRE DE L'ATLANTIQUE NORD

Gillespie (2018, comm. pers.) a fourni des données sommaires non publiées lors du 6^e atelier international sur la détection, la classification, la localisation et l'estimation des densités de mammifères marins à l'aide de l'acoustique passive qui s'est tenu à St. Andrews, en Écosse, en 2013 (réunion sur la comparaison des résultats en matière de détection de sons produits par la baleine noire). Les participants à la réunion ont reçu un ensemble de données acoustiques contenant un certain nombre de vocalises de baleine noire de l'Atlantique Nord et d'autres espèces qui avaient été préalablement validées manuellement par un analyste expérimenté. Par la suite, il s'est avéré que cet ensemble de données de test était incorrect, car il n'avait été validé que par un seul analyste et contenait des vocalises de baleine noire de l'Atlantique Nord non détectées (faux négatifs).

Les sept SDC testés comprenaient plusieurs détecteurs de Cornell, plusieurs détecteurs de Gillespie, le détecteur basé sur un noyau de Mouy (c.-à-d. le premier de JASCO; Mouy *et al.* 2009) et le détecteur à analyse de région continue (ARC; un algorithme de réseau neuronal). Le détecteur LFDCS de Baumgartner n'a pas été testé lors de cette réunion, pas plus que le dernier algorithme de Simard.

Dans l'ensemble, les sons de type « coup de feu » produits par la baleine noire de l'Atlantique Nord ne convenaient pas parfaitement à la détection automatique par les systèmes testés; aucune amélioration importante de l'efficacité des détecteurs de vocalises de contact à modulation ascendante n'a été constatée par rapport aux tests précédents. Tous les détecteurs

présentaient des taux de faux positifs similaires pour une efficacité donnée (figure 2) et l'efficacité des détecteurs dépendait fortement de l'objectif de leur application. Certains détecteurs présentaient un meilleur rappel à des taux de faux positifs très faibles, tandis que d'autres présentaient un meilleur rappel à des taux de faux positifs élevés (figure 2). L'efficacité de ces détecteurs a été influencée par plusieurs facteurs :

- le rapport signal sur bruit, qui est lié aux niveaux de bruit ambiant par rapport aux caractéristiques des vocalises cibles;
- le rapport signal sur bruit dépend également de l'emplacement de l'hydrophone et des caractéristiques du système d'enregistrement;
- d'autres éléments contextuels, tels que la présence d'autres espèces émettant des vocalises (en particulier la baleine à bosse dans la zone d'étude de l'Atlantique Nord-Ouest).

Les participants à la réunion ont conclu que si les SDC ont donné des résultats légèrement différents en matière de détection et de classification, ils ont tous atteint un taux de rappel d'environ 70 % (figure 2).

DÉTECTEUR LFDACS DE BAUMGARTNER

Le LFDACS est un détecteur basé sur la courbe de la hauteur du son (Baumgartner et Mussoline 2011) qui est utilisé pour rechercher les vocalises propres à des espèces dans les données de SAP provenant d'enregistreurs acoustiques fixes et dans les dispositifs logiciels/matériels de détection automatique personnalisés utilisés dans les planeurs mobiles (Baumgartner *et al.* 2013). Le LFDACS caractérise la variation temporelle des fréquences de vocalise dominantes en suivant la hauteur du son et classe les vocalises de baleine noire de l'Atlantique Nord en fonction des attributs des courbes de hauteur du son qui en résultent à l'aide de l'analyse discriminante quadratique (Baumgartner et Mussoline 2011). Le logiciel est en quelque sorte « généralisé », dans la mesure où les bibliothèques de vocalises sous-jacentes et les paramètres sur lesquels se basent ses performances peuvent être ajustés par l'utilisateur. Le bureau du MPO dans la région des Maritimes a commencé à utiliser l'algorithme du LFDACS de Baumgartner pour déterminer la présence de vocalises de baleine noire de l'Atlantique Nord dans les données de ses enregistreurs acoustiques. Par exemple, les ensembles de données de 2006 à 2014 de la région des Maritimes ont été analysés à l'aide de cet algorithme et inclus dans Davis *et al.* (2017), ainsi que 18 autres groupes, dont celui de la NOAA.

Baumgartner et Mussoline (2011) ont examiné la précision du détecteur LFDACS en l'utilisant pour analyser des enregistrements acoustiques effectués dans le golfe du Maine au cours des printemps 2006 et 2007. Ils ont constaté que l'algorithme du LFDACS était capable de compenser les bruits persistants à bande étroite et les bruits transitoires à large bande dans les enregistrements, et que sa précision était similaire à celle d'un analyste humain. En d'autres termes, la variabilité des différences entre ce SDC et un analyste était similaire à celle entre des analystes indépendants, et la variabilité temporelle des taux de vocalise était similaire entre le LFDACS et plusieurs analystes.

De même, Davis et ses collaborateurs (2017) ont déterminé que le taux de vocalises de contact à modulation ascendante manquées par le LFDACS était faible (25 %) et que, même si ce taux dépendait des caractéristiques de chaque déploiement, comme le bruit de fond ambiant et anthropique sur le site, les détections en résultant fournissaient néanmoins une indication satisfaisante de la répartition à grande échelle de la baleine noire de l'Atlantique Nord.

DÉTECTEUR SPECTROPLOTTER DE JASCO

Dans le passé, la région des Maritimes et la région de Terre-Neuve-Labrador du MPO ont utilisé le détecteur multiespèces (Spectroplotter) de JASCO pour détecter la présence de vocalises de contact à modulation ascendante de baleine noire de l'Atlantique Nord dans leurs ensembles de données acoustiques. Cet algorithme est un détecteur propriétaire basé sur le noyau, conçu par JASCO Applied Sciences comme il est décrit ci-dessous. Comme décrit dans un certain nombre de rapports de JASCO, les exemples de multiples vocalises de contact à modulation ascendante de baleine noire de l'Atlantique Nord détectées par le Spectroplotter ont été échantillonnés à partir de l'ensemble de données de la plateforme fixe de Cornell qui a été déployée au large des côtes du Massachusetts en 2000, 2008 et 2009. À titre de comparaison, la vocalise de contact à modulation ascendante de la baleine noire de l'Atlantique Nord décrite dans la bibliothèque de vocalises du LFDCS est basée sur 254 exemples de vocalises de contact à modulation ascendante provenant du sud-ouest et du centre du golfe du Maine en 2005 et 2009 (Martin *et al.* 2014). Ces exemples ayant été obtenus dans des lieux et à des dates similaires, JASCO en a conclu que les différences éventuelles en matière d'efficacité des détecteurs ne devaient pas être attribuées à des différences dans les bibliothèques de vocalises sous-jacentes.

JASCO (Delarue *et al.* 2018; Martin *et al.* 2014) a présenté les travaux effectués sur la détection des vocalises de la baleine noire de l'Atlantique Nord pour certains des ensembles de données sur lesquels le MPO a effectué son analyse du LFDCS. JASCO a testé le Spectroplotter sur un grand ensemble de données et a déterminé qu'il fonctionnait avec une faible précision en raison de l'interférence de gémissements tonaux produits par des baleines à bosse. Ces données indiquent que la précision de ce système variera suivant la saison en fonction de l'abondance locale de la baleine à bosse. JASCO a ensuite dû s'en remettre à la validation manuelle de certains ensembles de données; pour la baleine noire de l'Atlantique Nord, on a examiné manuellement une minute de chaque fichier sonore de 11 minutes (ce qui correspond à trois minutes par heure, soit 5 % des données enregistrées; voir page 76 dans Delarue *et al.* 2018). Extrait du rapport [traduction libre] : « Afin d'assurer une représentation précise des occurrences de baleines noires, nous avons procédé à un examen manuel supplémentaire des données enregistrées où et quand la présence de baleines noires était attendue, en fonction des connaissances actuelles sur la répartition saisonnière de l'espèce » (Delarue *et al.* 2018). JASCO a récemment réajusté le Spectroplotter afin d'augmenter la probabilité de détection des vocalises de contact à modulation ascendante émises par la baleine noire de l'Atlantique Nord et de réduire le nombre de faux positifs, mais le degré d'amélioration n'a pas encore été publié.

COMPARAISON, EN 2017, DES DÉTECTEURS LFDCS ET JASCO POUR LES VOCALISES DE CONTACT À MODULATION ASCENDANTE ÉMISES PAR LA BALEINE NOIRE DE L'ATLANTIQUE NORD

Bien qu'il ne s'agisse pas d'une comparaison exhaustive de ces SDC, Moore (2017) a entrepris un test du LFDCS et du Spectroplotter avec des données de vocalises de contact à modulation ascendante émises par des baleines noires de l'Atlantique Nord dans le bassin Roseway et le bassin d'Émeraude. Les enregistrements acoustiques recueillis à la fois par des planeurs Slocum et des systèmes de SAP fixes au cours de l'été et de l'automne 2015, et un sous-échantillon de 7 % de tous les enregistrements ont été validés manuellement par deux acousticiens expérimentés. Les résultats de l'analyse manuelle ont été comparés aux résultats des deux détecteurs automatiques sur trois échelles temporelles.

Le Spectroplotter utilise un spectrogramme binaire des bacs de fréquence temporelle au-dessus d'un seuil empirique, plutôt que le spectrogramme lissé (soustraction d'une moyenne de longue durée) qui est utilisé par le LFDCS (Baumgartner et Mussoline 2011; Martin *et al.*

2014). Alors que le Spectroplotter traite le spectrogramme à la recherche d'objets (ou d'événements) de fréquence temporelle en sélectionnant les bacs temporels contigus qui dépassent un seuil d'amplitude, le LFDCS détermine le début d'un son tonal au-dessus d'un seuil empirique (ci-après appelé « courbe de hauteur ») et utilise le suivi de la hauteur du son en avant et en arrière pour formaliser une courbe de hauteur (Baumgartner et Mussoline 2011; Martin *et al.* 2014). Les attributs sélectionnés dans le Spectroplotter comprennent l'heure (date), la durée (s), les fréquences minimale et maximale (Hz), la vitesse de balayage (pente), la tonalité et la largeur de bande (Hz) [figure 1b; Martin *et al.* 2014]. À titre de comparaison, les attributs sélectionnés dans le LFDCS comprennent la fréquence moyenne (Hz), la variation de fréquence, la variation de temps et la pente (Baumgartner et Mussoline 2011). Les attributs sélectionnés dans les deux détecteurs semblent similaires; cependant, alors que le détecteur basé sur le noyau extrait les attributs d'une vocalise directement du spectrogramme, le détecteur basé sur la courbe estime d'abord une courbe de hauteur en utilisant la variation temporelle de la fréquence fondamentale, à partir de laquelle les attributs du son sont extraits (Baumgartner et Mussoline 2011).

Pour ce petit ensemble de données, Moore a constaté que le LFDCS détectait plus de véritables vocalises de contact à modulation ascendante de baleine noire de l'Atlantique Nord (c'est-à-dire des vrais positifs) à toutes les échelles de temps comparativement au Spectroplotter, mais qu'il générait également un plus grand nombre de faux positifs. Aucune différence significative n'a été constatée dans le pourcentage de détection de vrais positifs dans les données du bassin d'Émeraude entre les deux SDC sur les échelles d'échantillonnage par fichier d'enregistrement (appelé « extrait »), par heure et par jour (tableau 2; figure 3a) [Moore 2017]. Dans les données du bassin Roseway, le pourcentage de vrais positifs quant à la détection de la baleine noire de l'Atlantique Nord sur les échelles horaire et quotidienne entre les détecteurs n'était pas différent, alors que le LFDCS a produit plus de vrais positifs sur une base par extrait (tableau 3; figure 3b). Moore en a conclu que les résultats du Spectroplotter et du LFDCS étaient comparables sur les échelles horaire et quotidienne.

La précision des deux SDC a été réduite avec les données du bassin d'Émeraude par rapport aux données du bassin Roseway (tableaux 2 et 3), mais un compromis semble émerger entre la maximisation des détections et la minimisation des faux négatifs. Alors que le LFDCS a détecté de véritables vocalises de contact à modulation ascendante sur 9 à 17 % plus de jours, le Spectroplotter a produit environ 10 % moins de fausses détections. L'analyse d'un ensemble de données qui génère un nombre élevé de faux négatifs, comme celui produit par le LFDCS, nécessitera une validation plus intensive, tandis qu'un ensemble de données avec moins de détections peut sous-estimer la présence acoustique de la baleine noire de l'Atlantique Nord. Si l'objectif est de déterminer la présence ou l'absence de la baleine noire de l'Atlantique Nord, utiliser un détecteur qui minimise les fausses détections (comme le Spectroplotter) serait plus efficace. Si l'objectif est d'observer l'utilisation saisonnière de l'habitat, utiliser un détecteur qui maximise les classifications de véritables vocalises de contact à modulation ascendante (comme le LFDCS) serait plus efficace.

Comme cette comparaison a porté sur des données collectées sur une courte période, elle n'a pas abordé les problèmes de détection des vocalises sur l'échelle plus large de niveaux de bruit de fond variables et de leur incidence sur les détections. L'une des comparaisons n'a pas non plus comparé les détections individuelles, mais a plutôt examiné le rapport entre les faux négatifs et les faux positifs sur une base par extrait. Cette dernière mesure est différente du taux de fausses alertes par rapport au taux de vocalises manquées lors de l'utilisation de détections et de vocalises individuelles, mais elle a néanmoins fourni de l'information sur la façon dont les deux détecteurs se comparent l'un à l'autre sur le même ensemble de données validé manuellement sur une base par fichier.

DISCUSSION

LES SDC DONNENT DES RÉSULTATS « ACCEPTABLES » CONCERNANT LES DONNÉES CONTENANT DES VOCALISES DE CONTACT À MODULATION ASCENDANTE DE BALEINE NOIRE DE L'ATLANTIQUE NORD

D'après plusieurs études, la plupart des SDC décrits dans ce document offrent des performances acceptables en ce sens qu'ils traitent les ensembles de données acoustiques beaucoup plus rapidement qu'une validation manuelle, et que leurs classifications des véritables vocalises de baleine noire de l'Atlantique Nord et leurs taux d'erreur sont acceptables, en particulier si les questions auxquelles on veut répondre sont larges (« Une baleine noire de l'Atlantique Nord a-t-elle été détectée à proximité de cet enregistreur aujourd'hui »). Les travaux antérieurs de Mellinger et Clark (2000) ont montré que les résultats en matière de corrélation des spectrogrammes (telle qu'elle est utilisée par le LFDCS et le Spectroplotter) se comparent favorablement aux trois autres méthodes utilisées pour la reconnaissance automatique des vocalises (filtres appariés, réseaux neuronaux et modèles de Markov cachés). Dans le cadre d'études ultérieures, Mellinger (2004) a de nouveau comparé les détections de vocalise de contact à modulation ascendante par corrélation de spectrogrammes et par réseau neuronal, et cette fois, le réseau neuronal a donné de meilleurs résultats (figure 5). Comme prévu, les résultats de toutes les méthodes s'améliorent généralement avec l'augmentation du rapport signal sur bruit.

Des tests ultérieurs de divers SDC plus récents en 2013 et 2017 ont permis de déterminer que ces SDC peuvent fonctionner avec un degré de précision et de rappel suffisant pour répondre à des questions basées sur la présence ou l'absence de la baleine noire de l'Atlantique Nord (p. ex., figure 2). Moore (2017) a conclu que le LFDCS détectait plus de véritables vocalises de contact à modulation ascendante de baleine noire de l'Atlantique Nord à toutes les échelles de temps que le Spectroplotter, mais qu'il générait également un plus grand nombre de faux positifs. La seule différence dans cette étude était la mesure F1 plus élevée du Spectroplotter à l'échelle par extrait pour les données du bassin Roseway (tableaux 2 et 3, figure 3).

Selon les seuils fixés (p. ex., pour le niveau acceptable de détection de faux négatifs ou de faux positifs concernant les vocalises de contact à modulation ascendante émises par la baleine noire de l'Atlantique Nord), et la quantité de validation manuelle nécessaire après le traitement par un SDC, le LFDCS et le Spectroplotter peuvent être utilisés pour automatiser les analyses de nombreux enregistrements acoustiques, et ainsi répondre aux questions relatives à la présence de la baleine noire de l'Atlantique Nord.

LE CONTEXTE DES VOCALISES DE CONTACT À MODULATION ASCENDANTE EST UN FACTEUR IMPORTANT EN CE QUI CONCERNE L'EFFICACITÉ DES SDC

Il existe une variété de facteurs contextuels importants pour l'efficacité de la classification des vocalises de contact à modulation ascendante par les SDC. Les facteurs les plus importants sont l'intensité relative et la clarté de l'enregistrement d'une vocalise (rapport signal sur bruit, Mellinger 2004) ainsi que la présence d'espèces produisant des sons similaires (p. ex., la baleine à bosse) à proximité. Un autre facteur peut être le taux de vocalise. Moore (2017) a constaté que les détecteurs LFDCS et Spectroplotter ont détecté de 23 à 31 % moins de véritables vocalises de contact à modulation ascendante dans les données du bassin d'Émeraude que dans les données du bassin Roseway (tableaux 2 et 3). Dans ce cas, Moore pensait que les baleines noires de l'Atlantique Nord dans le bassin Roseway pouvaient avoir affiché un taux de vocalise plus élevé et avoir ainsi offert plus d'occasions de détecter au moins une vocalise par extrait, par heure ou par jour.

Le comportement des animaux marins, y compris leur comportement acoustique, varie d'une saison et d'une zone géographique à l'autre, en fonction des paramètres de leur cycle de vie et de leurs expériences (Van Parijs *et al.* 2009). Par exemple, les analyses des types de vocalises émises par la baleine noire de l'Atlantique Nord dans les trois zones d'habitat montrent que cette espèce affiche un comportement de vocalise différent si elle se trouve dans son habitat de printemps ou son habitat d'été (figure 4; Van Parijs *et al.* 2009). Les différences suggèrent également que d'autres types de vocalises, comme les sons de type « coup de feu », peuvent être plus utiles pour détecter la présence de la baleine noire de l'Atlantique Nord dans certaines zones.

Lors de l'utilisation d'approches acoustiques pour mettre en œuvre des méthodes de gestion et d'atténuation pour la baleine noire de l'Atlantique Nord, il est donc important de tenir compte de la façon dont son répertoire de vocalises varie selon la saison et la région, et de la façon dont ce facteur et d'autres facteurs extérieurs au fonctionnement du SDC influenceront la capacité de ce dernier à détecter et à classer les sons de la baleine noire de l'Atlantique Nord.

DE BONS ÉCHANTILLONS DE VOCALISES DE CONTACT À MODULATION ASCENDANTE ET DES ENSEMBLES DE DONNÉES VALIDÉS MANUELLEMENT SONT ESSENTIELS POUR TESTER LES SDC

La SAP est plus utile dans le contexte de l'écologie comportementale acoustique de la baleine noire de l'Atlantique Nord et quand elle est appliquée dans un contexte régional et saisonnier approprié. Afin d'améliorer la SAP, il est nécessaire d'obtenir plus d'information sur l'utilisation des sons par les individus, les groupes et les populations de l'espèce et sur les sources de variabilité dans les vocalises.

Le LFDCS et le Spectroplotter s'appuient sur des bibliothèques sous-jacentes d'exemples de vocalises de contact à modulation ascendante pour rechercher des correspondances dans les ensembles de données analysés. Idéalement, ces échantillons de vocalises auront été prélevés dans de bonnes conditions de rapport signal sur bruit, et pour des zones et des saisons qui correspondent le plus possible à celles des ensembles de données analysés.

Les différences entre ces deux SDC n'auront pas d'incidence sur la capacité de tirer des conclusions générales sur la présence de la baleine noire de l'Atlantique Nord dans les eaux canadiennes de l'Atlantique, bien que nous n'ayons pas évalué le SDC de Simard. En raison des différences dans les approches employées dans les études acoustiques présentées ici, nous ne pouvons pas comparer directement les sites d'enregistrement, mais les tendances en matière de présence minimale observées dans chaque étude fourniront de l'information utile. Un plan pour une comparaison plus exhaustive des détecteurs, incluant l'algorithme utilisé dans le golfe du Saint-Laurent, serait pertinent au sujet des limites et des forces des différentes technologies de SDC et pourrait être souligné comme une mesure à prendre.

RECHERCHE FUTURE

Reconnaissant que la détection et la classification des mammifères marins à l'aide de la SAP sont devenues essentielles pour le MPO, il est nécessaire d'organiser une consultation locale/nationale sur la façon de traiter un certain nombre de problèmes liés aux données de la SAP en matière de vitesse de traitement et de précision de la classification.

- Création d'outils de détection/classification aux performances similaires pour des considérations multiespèces dans différents environnements (optimisation).
- Recommandations sur la façon de faire progresser le processus de développement des détecteurs vers une approche nationale pour le MPO.

-
- Directives d'homologation concernant les meilleures pratiques en matière d'analyse acoustique et de production de rapports connexes.
 - Résolution des problèmes de format optimal des données et de stockage des données acoustiques à grande échelle.

COMPARAISON ET OPTIMISATION DES SDC – VALIDATION MANUELLE

Une comparaison et une optimisation robustes des détecteurs nécessiteraient beaucoup de travail, notamment la mise à l'épreuve du SDC avec de multiples ensembles de données recueillis à l'aide de différents systèmes d'enregistrement, avec des niveaux de bruit de fond variables, et dans différentes zones géographiques, afin de valider les vocalises. Ces ensembles de données devront être validés manuellement par au moins deux acousticiens expérimentés¹. Pour cette comparaison de SDC, nous recommandons d'utiliser au moins cinq échantillons sous-marins enregistrés pendant 10 heures :

1. enregistrement numérique contenant de nombreuses vocalises de baleine noire de l'Atlantique Nord;
2. enregistrement numérique contenant peu de vocalises de baleine noire de l'Atlantique Nord;
3. enregistrement numérique contenant de nombreuses vocalises de baleine noire de l'Atlantique Nord et un niveau élevé de bruit ambiant;
4. enregistrement numérique contenant peu de vocalises de baleine noire de l'Atlantique Nord et un niveau élevé de bruit ambiant;
5. enregistrement numérique contenant une quantité similaire de vocalises de baleine noire de l'Atlantique Nord et de baleine à bosse.

Avant le début du processus de validation manuelle, un processus d'analyse devra être établi pour inclure des règles destinées à annoter les cibles comme étant des vocalises de contact à modulation ascendante de baleine noire de l'Atlantique Nord confirmées. Bien que de nombreux cas soient sans équivoque, dans certains cas, il n'est pas évident que la vocalise a réellement été émise par une baleine noire de l'Atlantique Nord, et les analystes peuvent avoir des méthodes différentes pour les catégoriser. Un consensus scientifique devrait être établi sur les étapes du processus de validation.

COMPARAISON ET OPTIMISATION DES SDC – TRAITEMENT PAR LES DÉTECTEURS

Comme pour le processus de validation manuelle, des étapes claires doivent être établies pour le traitement par les SDC des échantillons sonores d'essai. Par exemple, le point choisi pour le réglage de chaque algorithme sur la courbe de rappel par rapport à la précision doit être documenté. Chaque algorithme de SDC devra rejoindre un point précis de cette courbe (cible), selon que l'objectif est de ne manquer aucune vocalise de l'espèce cible (au prix de l'acceptation d'un taux plus élevé de faux positifs), ou de limiter le taux de faux positifs. Tous les algorithmes devraient atteindre un niveau de précision donné, et dans ce cas, nous devrions considérer que ce niveau est inférieur à un taux de faux positifs de 10 %.

¹ Ces recommandations pourraient servir à la rédaction d'un énoncé de travail pour la validation manuelle de ces ensembles de données. Pour tenir compte du biais des analystes en acoustique, au moins deux analystes qualifiés devraient traiter un sous-ensemble d'enregistrements et comparer leurs résultats.

En outre, un test ou une comparaison optimale des SDC sera basé sur des fichiers contenant des détections horodatées et validées manuellement de vocalises de contact émises par des baleines noires de l'Atlantique Nord, et des résumés des heures présentant des vocalises de contact de baleine noire de l'Atlantique Nord (c'est-à-dire après l'élimination des sons similaires produits par la baleine à bosse); leur comparaison fournira des preuves de l'efficacité du détecteur.

Grâce aux progrès en matière de capacité d'apprentissage automatique et de puissance de traitement des ordinateurs individuels, il convient de tenir compte des SDC à réseaux neuronaux qui, dans certains essais, ont donné des résultats aussi bons, voire meilleurs, que les systèmes de correspondance des spectrogrammes (figure 5; Mellinger 2004).

COMPARAISON ET OPTIMISATION DES SDC – ATELIER INTERNATIONAL

Un atelier, qui pourrait être mené en collaboration avec Meridian, visant à examiner les résultats de ce processus de comparaison et d'optimisation des SDC permettrait d'améliorer nos connaissances sur le sujet. Les travaux pertinents proposés par Meridian sur une plus longue période pourraient contribuer à une étude comparative plus complète des détecteurs (comme l'inclusion d'autres types de sons produits par la baleine noire de l'Atlantique Nord, et l'élargissement de l'usage des SDC à d'autres espèces comme Baumgartner et Mussoline (2011) l'ont fait avec le LFDCS. En outre, l'atelier pourrait être un forum destiné à améliorer d'autant plus l'utilisation des SDC par le MPO en renforçant les relations de travail avec des collaborateurs.

CONCLUSIONS

- La détection et la classification automatisées des vocalises émises par la baleine noire de l'Atlantique Nord et d'autres mammifères marins sont hautement souhaitables pour les chercheurs et les gestionnaires qui cherchent à surveiller la présence de baleines dans certaines zones afin de mettre en œuvre des mesures de gestion.
- Ce type de traitement acoustique automatisé est particulièrement important pour les approches de surveillance en temps réel qui traitent de grandes quantités de données acoustiques.
- Une réunion d'évaluation de SDC en 2013 a démontré des performances similaires pour sept détecteurs (environ 70 % de résultats corrects), ce qui a été influencé par plusieurs facteurs :
 - le rapport signal sur bruit, qui est lié aux niveaux de bruit ambiant par rapport aux caractéristiques des vocalises cibles;
 - le rapport signal sur bruit dépend également de l'emplacement de l'hydrophone et des caractéristiques du système d'enregistrement;
 - d'autres éléments contextuels, tels que la présence d'autres espèces émettant des vocalises (en particulier la baleine à bosse dans la zone d'étude de l'Atlantique Nord-Ouest).
- Le Spectroplotter et le LFDCS (les algorithmes que la région des Maritimes et la région de Terre-Neuve-et-Labrador ont utilisés pour analyser des enregistrements acoustiques) donnent de bons résultats, bien que dans une étude, le LFDCS ait détecté plus de véritables vocalises de contact à modulation ascendante de baleine noire de l'Atlantique Nord que le Spectroplotter, mais ait également généré plus de faux positifs.

-
- Tous les détecteurs utilisés devraient offrir des résultats positifs similaires, étant donné les données (p. ex., les heures avec vocalise/jour) utilisées pour présenter les occurrences de baleine noire de l'Atlantique Nord dans le temps. Plusieurs SDC ont présenté des résultats similaires dans le cadre de la réunion tenue dans le cadre du 6^e atelier international sur la détection, la classification, la localisation et l'estimation des densités de mammifères marins (2013) et dans le contexte de plusieurs études en 2017. Si les taux de faux positifs et les taux de vocalises manquées sont présentés dans les documents de recherche sur la SAP, ces mesures de précision offriront un aperçu sur la façon dont les détecteurs se démarquent sans faire de comparaison directe.
 - Un test approfondi des différents SDC nécessiterait une série d'ensembles de données acoustiques validées manuellement et provenant d'un ensemble représentatif de lieux, de périodes, de saisons et de matériel d'enregistrement. Une telle comparaison des SDC, en particulier la comparaison des résultats des détecteurs LFDCS, de JASCO (Spectroplotter) et de Simard, ainsi que d'autres détecteurs potentiels, serait une activité utile, mais nécessiterait de convenir de données et de seuils d'efficacité pour les SDC.
 - Les comparaisons d'algorithmes sont moins importantes dans les analyses historiques de la baleine noire de l'Atlantique Nord puisque les données qui découlent des résultats de détection actuels sont présentées à une échelle suffisamment grande (« Une baleine noire de l'Atlantique Nord a-t-elle été détectée à proximité de cet enregistreur aujourd'hui »?) pour que les légères différences en matière d'efficacité des algorithmes ne soient pas perceptibles après le processus d'amalgamation et de cumul. Avec les mêmes données recueillies dans des lieux et des contextes similaires, l'influence de ces facteurs sous-jacents devrait être moins préoccupante. À des échelles d'échantillonnage spatiales et temporelles plus petites, les différences en matière d'efficacité des algorithmes deviennent plus importantes.
 - La prochaine génération de certains SDC des États-Unis intégrera le contexte dans sa logique (p. ex., la présence d'autres mammifères marins ou de sources sonores abiotiques et le rapport signal sur bruit). Par exemple, à l'heure actuelle, les performances de certains SDC varient en fonction du lieu et de la saison, et l'ajustement de la précision ou l'inclusion de seuils de détection propres au contexte peuvent corriger la situation.

REMERCIEMENTS

Je remercie H. Moors-Murphy (MPO), Y. Simard (MPO) et S. Van Parijs (NOAA) d'avoir fourni d'importants commentaires sur une version précédente du présent document de recherche. M. Van Parijs a obtenu de D. Gillespie les résultats non publiés de la réunion de comparaison des SDC tenue en 2013.

RÉFÉRENCES CITÉES

- Baumgartner, M.F., and Mussoline, S.E. 2011. [A generalized baleen whale call detection and classification system](#). J. Acoust. Soc. Am. 129(5): 2889–2902.
- Baumgartner, M.F., Fratantoni, D.M., Hurst, T.P., Brown, M.W., Cole, T.V.N., Van Parijs, S.M., and Johnson, M. 2013. [Real-time reporting of baleen whale passive acoustic detections from ocean gliders](#). J. Acoust. Soc. Am. 134(3): 1814–1823.

-
- Baumgartner, M.F., Stafford, K.M., and Latha, G. 2018. Near Real-Time Underwater Passive Acoustic Monitoring of Natural and Anthropogenic Sounds. In *Observing the Oceans in Real Time*. Edited by R. Venkatesan, A. Tandon, E.A. D'Asaro, and M.A. Atmanand. Springer International Publishing, Cham. 203–226.
- Davis, G.E., Baumgartner, M.F., Bonnell, J.M., Bell, J., Berchok, C., Bort Thornton, J., Brault, S., Buchanan, G., Charif, R.A., Cholewiak, D., Clark, C.W., Corkeron, P., Delarue, J., Dudzinski, K., Hatch, L., Hildebrand, J., Hodge, L., Klinck, H., Kraus, S., Martin, B., Mellinger, D.K., Moors-Murphy, H., Nieu Kirk, S., Nowacek, D.P., Parks, S., Read, A.J., Rice, A.N., Risch, D., Širović, A., Soldevilla, M., Stafford, K., Stanistreet, J.E., Summers, E., Todd, S., Warde, A., and Van Parijs, S.M. 2017. [Long-term passive acoustic recordings track the changing distribution of North Atlantic right whales \(*Eubalaena glacialis*\) from 2004 to 2014](#). *Sci. Rep.* 7(1): 13460.
- Delarue, J., Kowarski, K.A., Maxner, E.E., MacDonnell, J.T., and Martin, S.B. 2018. [Acoustic Monitoring Along Canada's East Coast: August 2015 to July 2017](#). Document Number 01279. Environmental Studies Research Funds Report Number 215, Version 1.0. Tech. Rep. by JASCO Applied Sciences for Environmental Studies Research Fund, Dartmouth, NS, Canada. 120 pp + appendices.
- Dugan, P.J., Rice, A.N., Urazghildiiev, I.R., and Clark, C.W. 2010a. North Atlantic Right Whale acoustic signal processing: Part I. Comparison of machine learning recognition algorithms. In 2010 IEEE Long Island Systems, Applications and Technology Conference, Farmingdale, NY. 1–6.
- Dugan, P.J., Rice, A.N., Urazghildiiev, I.R., and Clark, C.W. 2010b. [North Atlantic right whale acoustic signal processing: Part II. improved decision architecture for auto-detection using multi-classifier combination methodology](#). In 2010 IEEE Long Island Systems, Applications and Technology Conference. Farmingdale, NY, USA. 1–6.
- Gillespie, D. 2004. Detection and classification of right whale calls using an 'edge' detector operating on a smooth spectrogram. *Can. Acoust.* 32(2): 39–47.
- Martin, B., Kowarski, K., Mouy, X., and Moors-Murphy, H. 2014. Recording and identification of marine mammal vocalizations on the Scotian Shelf and slope. In *Oceans 2014 Conference*, St. John's, NL. 1–6.
- Mellinger, D. 2004. A comparison of methods for detecting right whale calls. *Can. Acoust.* 32(2): 55–65.
- Mellinger, D.K., and Clark, C.W. 2000. [Recognizing transient low-frequency whale sounds by spectrogram correlation](#). *J. Acoust. Soc. Am.* 107(6): 3518–3529.
- Mellinger, D.K., Nieu Kirk, S.L., Matsumoto, H., Heimlich, S.L., Dziak, R.P., Haxel, J., Fowler, M., Meinig, C., and Miller, H.V. 2007a. [Seasonal occurrence of North Atlantic right whale \(*Eubalaena glacialis*\) vocalizations at two sites on the Scotian Shelf](#). *Mar. Mamm. Sci.* 23(4): 856–867.
- Mellinger, D.K., Stafford, K.M., Moore, S.E., Dziak, R.P., and Matsumoto, H. 2007b. [An Overview of Fixed Passive Acoustic Observation Methods for Cetaceans](#). *Oceanogr.* 20(4): 36–45.
- Moore, D. 2017. Is Emerald Basin, Scotian Shelf, Canada, a North Atlantic right whale (*Eubalaena glacialis*) feeding habitat? Honours Thesis, Bachelor of Science in Marine Biology. Biology Dept., Dalhousie University. viii + 55 p.

-
- Mouy, X., Bahoura, M., and Simard, Y. 2009. [Automatic recognition of fin and blue whale calls for real-time monitoring in the St. Lawrence](#). J. Acoust. Soc. Am. 126(6): 2918–2928.
- Simard, Y., and Roy, N. 2008. Detection and localization of blue and fin whales from large-aperture autonomous hydrophone arrays: A case study from the St. Lawrence estuary. Can. Acoust. 36(1): 104–110.
- Urazghildiiev, I.R., and Clark, C.W. 2006. [Acoustic detection of North Atlantic right whale contact calls using the generalized likelihood ratio test](#). J. Acoust. Soc. Am. 120(4): 1956–1963.
- Van Parijs, S.M., Clark, C.W., Sousa-Lima, R.S., Parks, S.E., Rankin, S., Risch, D., and Van Opzeeland, I.C. 2009. [Management and research applications of real-time and archival passive acoustic sensors over varying temporal and spatial scales](#). Mar. Ecol. Prog. Ser. 395: 21–36.
- Verfuß, U.K., Honnef, C.G., Meding, A., Dähne, M., Mundry, R., and Benke, H. 2007. [Geographical and seasonal variation of harbour porpoise \(*Phocoena phocoena*\) presence in the German Baltic Sea revealed by passive acoustic monitoring](#). J. Mar. Biol. Assoc. UK. 87(1): 165–176.

TABLEAUX ET FIGURES

Tableau 1. Caractéristiques de fonctionnement des algorithmes de détection et de classification pris en compte dans ce document.

Détecteur	Espèces cibles	Fonction	Remarques
SDC de Gillespie	Baleine noire de l'Atlantique Nord	Comparaison des caractéristiques du spectrogramme	Tout d'abord, le spectrogramme est lissé en le convoluant avec un noyau gaussien et les « contours » des sons sont extraits à l'aide d'un algorithme de détection de contours. Ensuite, les paramètres sont utilisés dans une fonction de classification afin de recenser les sons provenant de baleines noires de l'Atlantique Nord.
SDC de Cornell	Baleine noire de l'Atlantique Nord	Une variété de fonctions, mais une basée sur un rapport de probabilité généralisé	Détecteur de signaux à phase polynomiale d'amplitude inconnue et à coefficients polynomiaux observés en présence d'un bruit gaussien localement stationnaire. La représentation en forme fermée d'une statistique minimale suffisante est dérivée et un schéma de détection réalisable est développé.
SDC de Mouy (JASCO)	Baleine noire de l'Atlantique Nord + autres	Comparaison des caractéristiques du spectrogramme	Ce SDC multiespèces est basé sur une bibliothèque sous-jacente de sons de mammifères.
Détecteur ARC	Baleine noire de l'Atlantique Nord	Détecteur à réseau neuronal	Malgré un niveau relativement faible de faux positifs dans les détections de vocalises de contact à modulation ascendante de baleine noire de l'Atlantique Nord, l'ARC a démontré la plus faible précision de tous les détecteurs.
LFDCS	Baleine noire de l'Atlantique Nord, rorqual commun, rorqual boréal	Détecteur basé sur la courbe de hauteur du son avec une bibliothèque de vocalises sous-jacente	SDC des basses fréquences avec des paramètres réglables et des bibliothèques de vocalises sous-jacentes modifiables.
LSTM	Baleine noire de l'Atlantique Nord	-	Un collègue responsable du Plan de protection des océans à l'IOB du MPO travaille avec Wright sur un nouvel algorithme de détection des vocalises de baleine noire de l'Atlantique Nord.
SDC de Dugan et ses collaborateurs	Baleine noire de l'Atlantique Nord	Classificateurs à arbre de classification et de régression (CART)	L'algorithme CART a présenté un taux de vrais positifs plus élevé, et un taux de faux positifs similaire à l'algorithme NET
SDC de Dugan et ses collaborateurs	Baleine noire de l'Atlantique Nord	Réseaux neuronaux artificiels (NET)	-

Tableau 2. Nombre de détections de vocalises de contact à modulation ascendante étant des faux négatifs, faux positifs, vrais positifs et vrais négatifs par extrait, par heure et par jour pour les détecteurs LFDCS et Spectroplotter dans les enregistrements acoustiques du bassin d'Émeraude. Le pourcentage de vraies détections (nombre de vraies détections parmi toutes les véritables vocalises validées manuellement), le pourcentage de fausses détections (nombre de fausses détections parmi toutes les unités sans vocalise validées manuellement), le rappel, la précision et la mesure F1 sont également indiqués (adapté de Moore 2017).

-	Faux négatifs	Faux positifs	Vrais positifs	Vrais négatifs	% de vraies détections	% de fausses détections	Rappel	Précision	Mesure F1
Par extrait									
LFDCS	19	410	49	5 522	72 %	7 %	0,72	0,11	0,19
Spectroplotter	29	278	39	5 654	57 %	5 %	0,57	0,12	0,20
Par heure									
LFDCS	30	67	30	2 873	50 %	2 %	0,50	0,31	0,38
Spectroplotter	38	36	22	2 904	37 %	1 %	0,37	0,38	0,37
Par jour									
LFDCS	10	27	20	10	67 %	28 %	0,67	0,43	0,52
Spectroplotter	15	17	15	15	50 %	18 %	0,50	0,47	0,48

Tableau 3. Nombre de détections de vocalises de contact à modulation ascendante étant des faux négatifs, faux positifs, vrais positifs et vrais négatifs par extrait, par heure et par jour pour les détecteurs LFDCS et Spectroplotter dans les enregistrements acoustiques du bassin Roseway. Le pourcentage de vraies détections (nombre de vraies détections parmi toutes les véritables vocalises validées manuellement), le pourcentage de fausses détections (nombre de fausses détections parmi toutes les unités sans vocalise validées manuellement), le rappel, la précision et la mesure F1 sont également indiqués (adapté de Moore 2017).

-	Faux négatifs	Faux positifs	Vrais positifs	Vrais négatifs	% de vraies détections	% de fausses détections	Rappel	Précision	Mesure F1
Par extrait									
LFDCS	74	1 690	415	3 821	85 %	31 %	0,85	0,20	0,32
Spectroplotter	255	94	234	5 417	48 %	2 %	0,48	0,71	0,57
Par heure									
LFDCS	167	157	218	2 459	57 %	6 %	0,57	0,58	0,57
Spectroplotter	193	75	192	2 541	50 %	3 %	0,50	0,72	0,59
Par jour									
LFDCS	7	23	65	30	90 %	43 %	0,90	0,74	0,81
Spectroplotter	14	18	58	35	81 %	34 %	0,81	0,76	0,78

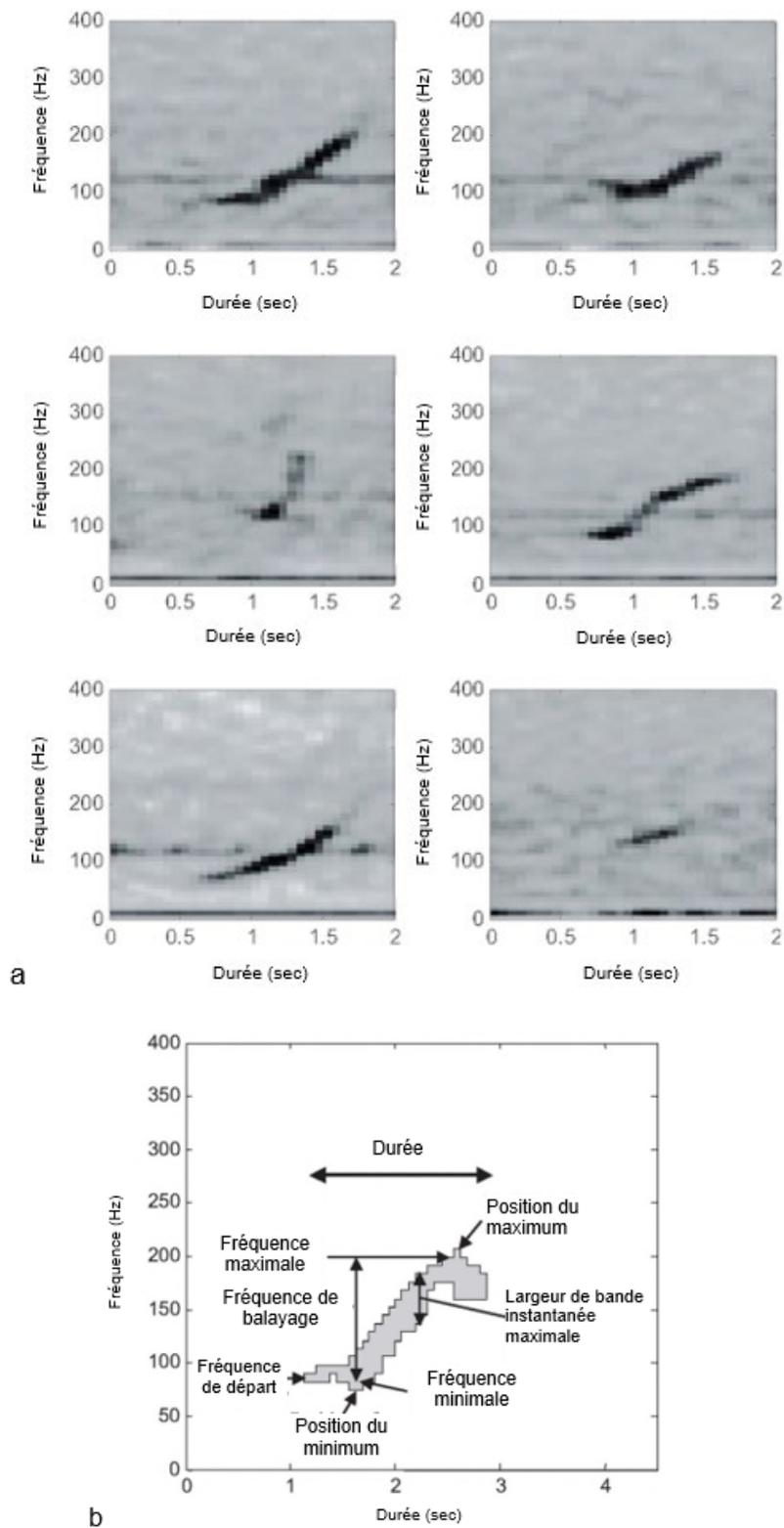


Figure 1(a). Spectrogrammes de vocalises de contact à modulation ascendante émises par des baleines noires de l'Atlantique Nord (adaptés de Gillespie 2004), et 1(b) paramètres d'échantillon mesurés par plusieurs SDC mentionnés dans ce document pour la baleine noire de l'Atlantique Nord.

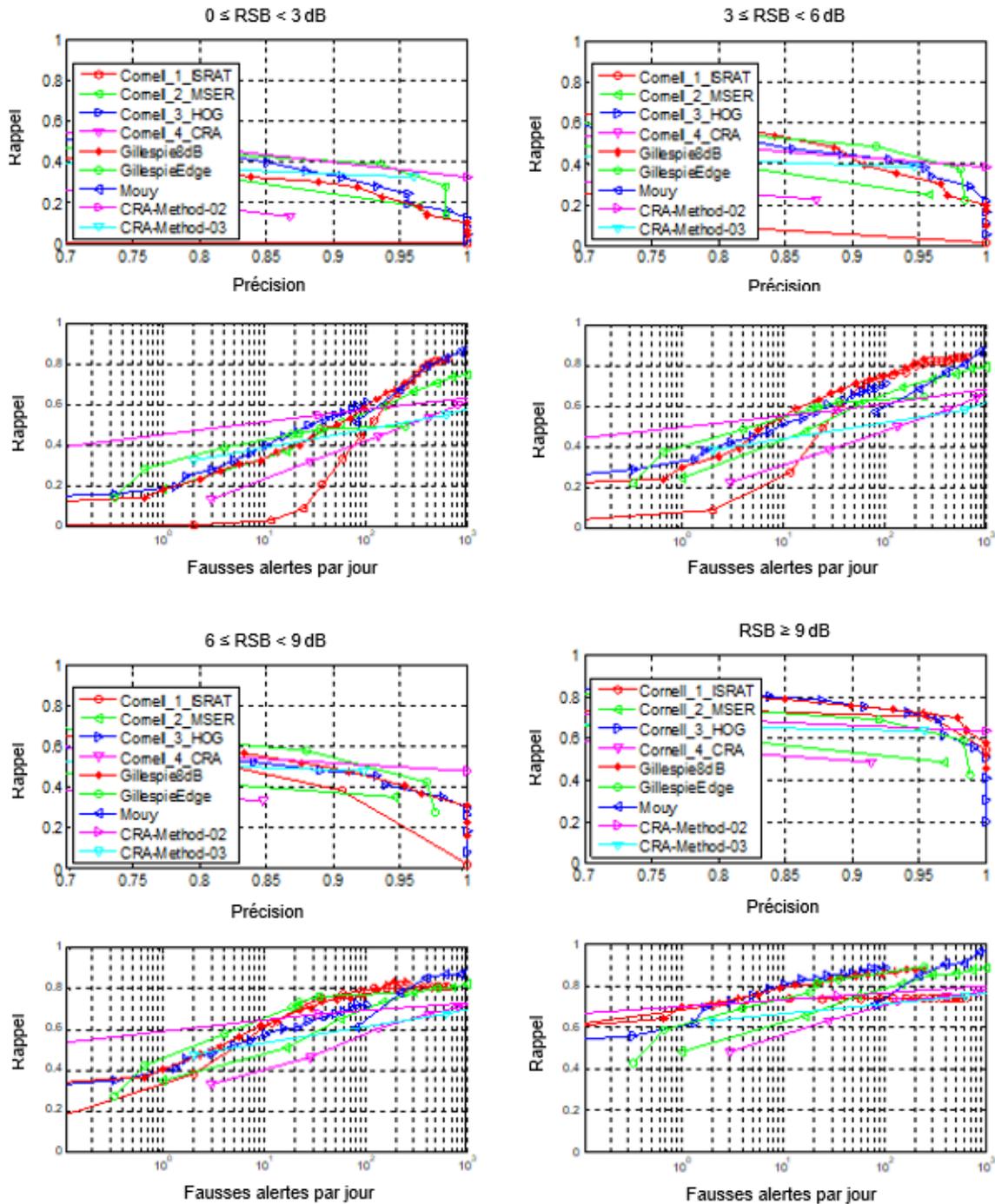


Figure 2. Efficacité relative des détecteurs automatiques dans quatre régimes de bruit différents. Détecteurs de Cornell, de Gillespie, de Mouy (JASCO) et ARC. Images reproduites avec l'aimable autorisation de D. Gillespie.

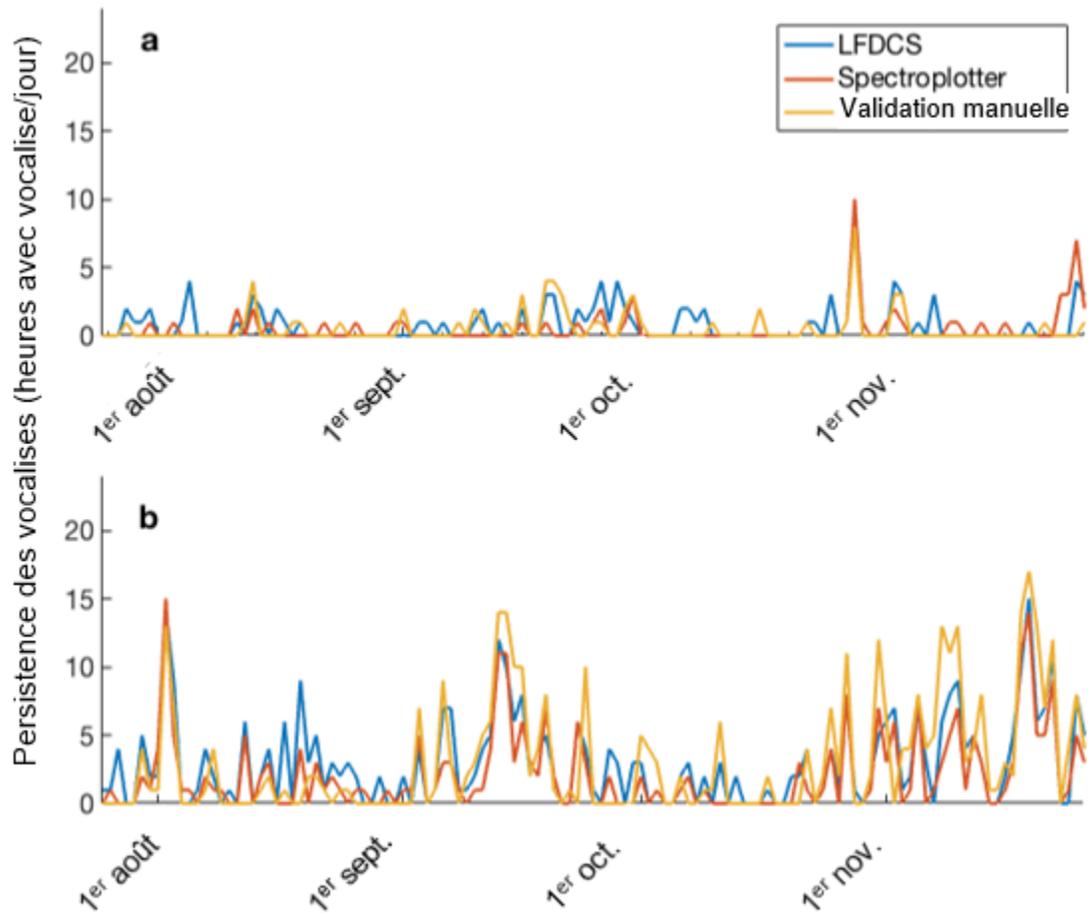


Figure 3. Tracés de la persistance quotidienne des vocalises dans (a) le bassin d'Émeraude et (b) le bassin Roseway. Détections automatiques non validées du LFDCS en bleu, détections automatiques non validées du Spectroplotter en orange et résultats validés manuellement en jaune (tirés de Moore 2017).

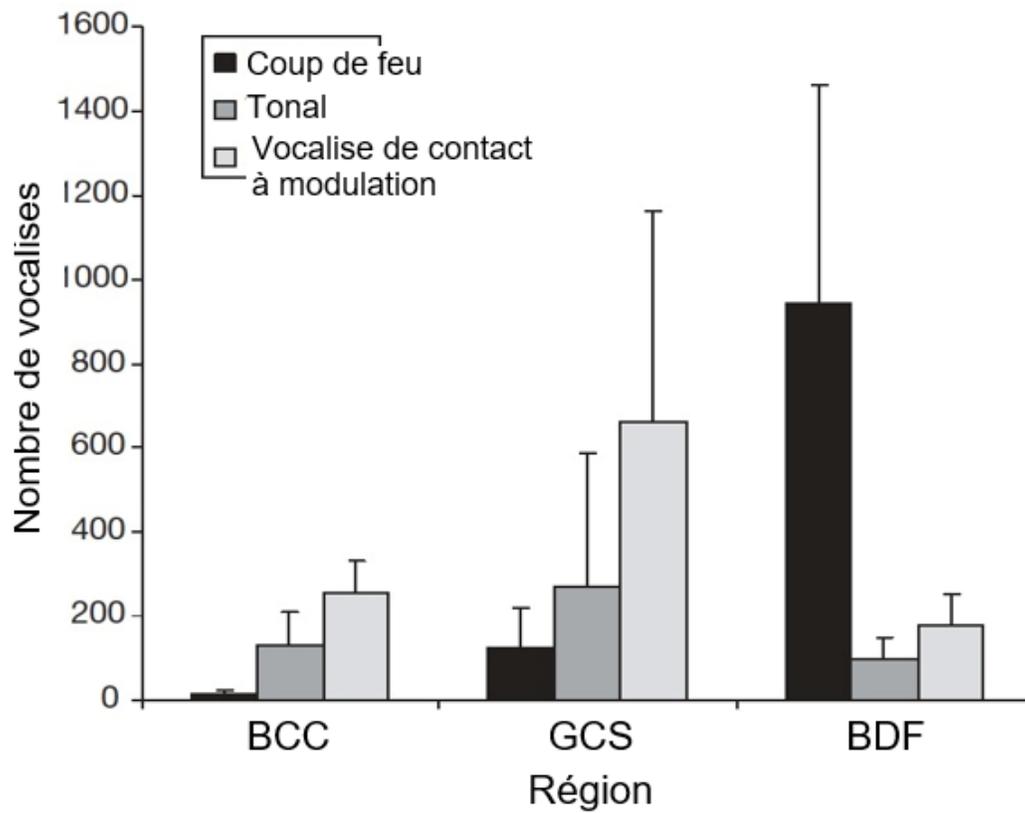


Figure 4. Enregistreurs de SAP d'archives déployés dans trois habitats de la baleine noire de l'Atlantique Nord (baie du Cap-Cod [BCC], Grand chenal Sud [GCS] et baie de Fundy [BDF]) ayant démontré des différences dans le nombre médian (\pm ET) de vocalises de baleine noire de l'Atlantique Nord par jour pour trois types de vocalises (figure 2 dans Van Parijs et al. 2009).

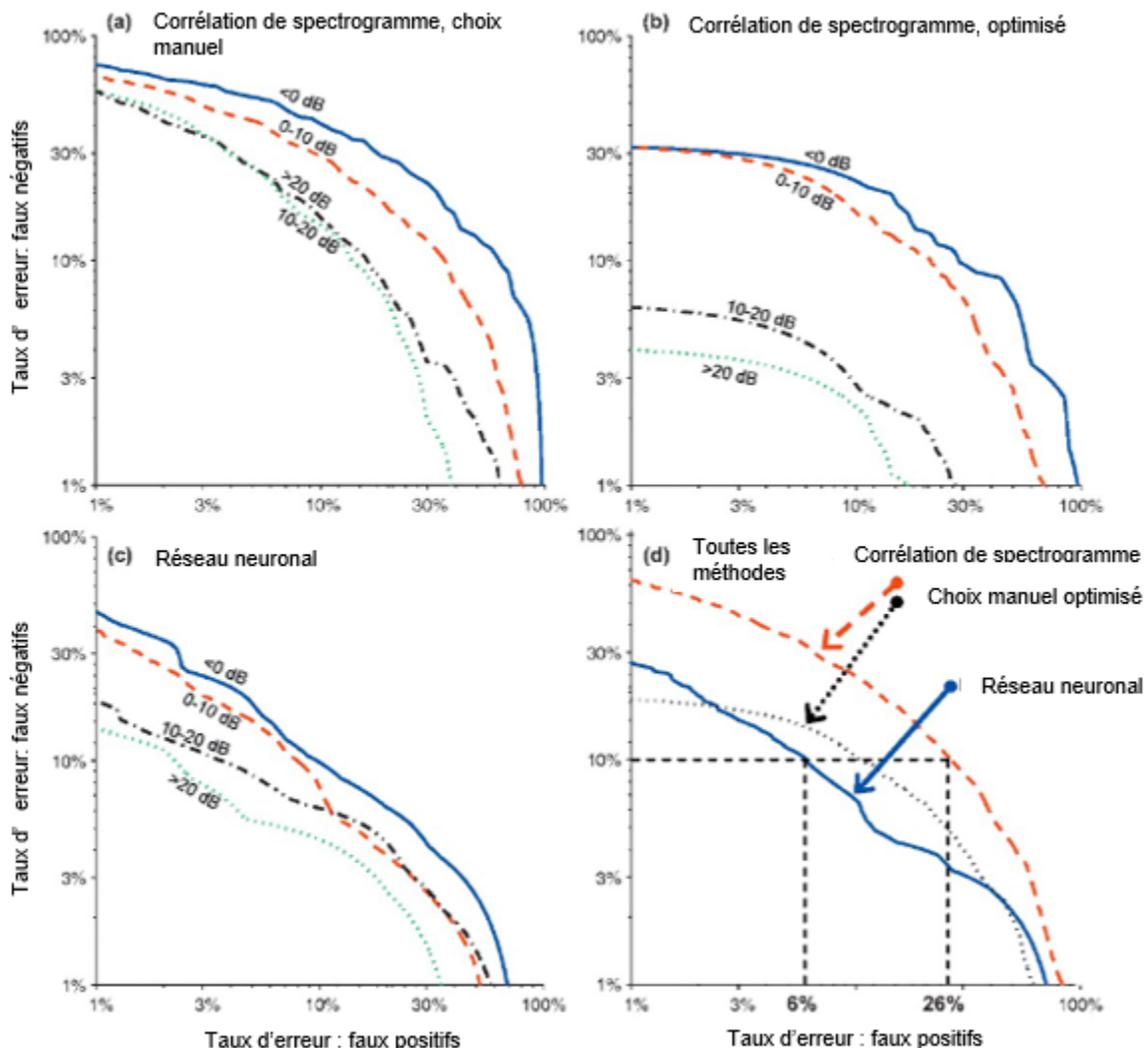


Figure 5. Courbes de performance des trois méthodes fondées sur un SDC (corrélation de spectrogramme et réseau neuronal) comparées dans Mellinger (2004); plus l'aire sous la courbe est faible, plus le détecteur est performant. Les étiquettes sur les courbes dans les graphiques (a) à (c) représentent le rapport signal sur bruit des vocalises de contact à modulation ascendante utilisé pour cette courbe. Dans le graphique (d), les SDC sont comparés en fonction des données sur tous les rapports signal sur bruit combinés (figure 4 dans Mellinger 2004).