# Classification et détection d'habitats benthiques à l'aide de signatures sonores

## Sébastien Durand, Pierre Legendre

Département de sciences biologiques, Université de Montréal, Case postale 6128, succursale Centre-ville, Montréal (Québec) Canada, H3C 3J7

RÉSUMÉ. Étudier la nature des grands fonds marins sur de vastes étendues a toujours été une tâche fastidieuse même en utilisant un sous-marin muni de lampes puissantes et de caméras. L'acquisition de données visuelles détaillées est limitée à de petites superficies à cause du manque de visibilité. Grâce à la télédétection sonore, l'étude spatiotemporelle des milieux benthiques profonds est dorénavant à la portée des écologistes. Nous avons élaboré une méthode d'analyse permettant de classifier les ondes sonores et de relier les groupes ainsi formés à des types d'habitats. Nous décrirons en détail certains aspects de la méthode : d'abord comment identifier les variables les plus représentatives des signaux sonores, puis déterminer l'influence de différentes variables du substrat marin sur les signaux sonores enregistrés.

MOTS-CLÉS : Analyse discriminante canonique, écho sonore, habitat, radiale Juan de Fuca, sonar, source hydrothermale, submersible téléguidé, télédétection.

## 1 Introduction

Depuis longtemps, l'homme tente de comprendre la nature des ondes sonores. Comme le font plusieurs autres espèces animales, nous utilisons le son afin de communiquer entre nous. Chez certains mammifères, le son sert aussi à des fins de navigation et même à l'identification d'objets éloignés. Le fond des abysses océaniques, composé de roc et de sédiments, baigne dans un milieu qui absorbe fortement la lumière. On y trouve des communautés animales et bactériennes qui vivent dans l'obscurité. L'aptitude des chauves-souris et des dauphins à détecter des objets à distance grâce à des échos sonores nous montre que les diverses textures et densités propres aux aires échantillonnées affectent d'une façon significative la nature des échos sonores qui peuvent être enregistrés par nos appareils. Par l'analyse de variables décrivant la forme et l'intensité de ces signaux, nous chercherons à identifier à distance les habitats d'un champ hydrothermal et, éventuellement, à cartographier les habitats du milieu benthique sur de grandes surfaces.

Il n'existe pas de méthode standard pour l'extraction, la transformation et le traitement des variables tirées de signaux sonores. Cela n'est pas surprenant. D'une part, les méthodes d'interprétation d'ondes sonores ne sont encore qu'en phase exploratoire ou sont gardées secrètes par des compagnies privées. D'autre part, de nombreux types d'habitats marins n'ont pas encore été étudiés et de nombreuses fréquences et tailles d'empreintes sonores n'ont pas encore été utilisées. Il serait donc difficile d'établir des standards pour une méthodologie aussi jeune. Le présent article constitue une introduction à l'approche analytique de ce nouveau champ d'études. Il décrit la méthode d'analyse des échos sonores que nous avons développée et utilisée dans nos travaux.

Au cours de nos travaux récents [DUR soumis] basés sur ceux de Clarke et Hamilton [CLA 99], nous avons [1] testé diverses méthodes de transformation des données ; [2] démontré visuellement l'importance de normaliser les données sonores en fonction de leur altitude d'acquisition (distance au fond marin); [3] démontré que la variation de la taille des empreintes sonores influe sur les capacités discriminantes des ondes sonores ; et [4] créé un jeu de variables permettant la discrimination efficace des signatures sonores acquises dans les habitats dominants qui se retrouvent à l'intérieur de notre site d'étude.

## 2 Méthode

## 2.1 Acquisition des données

Les données analysées dans cet article ont été récoltées par le ROPOS, un sous-marin canadien télécommandé depuis un navire de la garde côtière canadienne, le John P. Tully. Au cours de la mission *High Rise* en mai 2001, nous avons étudié le champ de sources hydrothermales Clambed situé par 2200 m de fond sur la radiale Juan de Fuca, à quelque 200 miles marins à l'ouest de l'île de Vancouver dans le Pacifique. Les caméras du ROPOS ont filmé les habitats de ce champ hydrothermal en même temps que nous récoltions des signaux sonores à l'aide d'un sonar Imagenex 881B. Le plan d'échantillonnage comportait 18 transects verticaux (1 à 10 m d'altitude) visant les cinq communautés principales ainsi que 12 transects horizontaux (1 à 5 m d'altitude) couvrant les principaux gradients naturels de ces milieux profonds. La fréquence d'échantillonnage moyenne était de trois signaux sonores par seconde.

#### 2.2 Traitement des données et extraction des variables

Puisque les ondes sonores sont affectées par des phénomènes aléatoires comme le bruit ambiant, l'instabilité des capteurs du ROPOS et du sonar, ainsi que par la variabilité naturelle des signaux, le calcul de la moyenne de plusieurs échos successifs augmente la stabilité du signal sonore [HAM 99] et permet aussi l'obtention de données représentant un intervalle temporel choisit par le chercheur. Après avoir calculé la moyenne des signaux, on extrait une première variable, l'altitude, car c'est à partir de cette variable que nous effectuerons tous les filtrages initiaux, corrections et normalisation pour la profondeur. Puisqu'il n'existe aucune méthode standard d'extraction de la variable altitude, nous avons créé notre propre algorithme. Ainsi, à l'intérieur d'un écho sonore, nous avons utilisé comme marqueur temporel servant à l'estimation de l'altitude d'acquisition le point correspondant à 80 % de la valeur d'intensité maximum de l'onde sonore temporairement lissée.

Afin de permettre la comparaison des informations extraites de différents signaux sonores, une normalisation en fonction de l'altitude est nécessaire. En fait, lorsqu'une onde sonore se déplace dans l'eau, son intensité diminue, car non seulement l'onde s'étire de façon sphérique, mais l'eau servant de support absorbe aussi une partie de l'énergie de l'onde. Dans la plupart des cas, le taux d'absorption exacte au site d'échantillonnage n'est pas connu. Il est donc nécessaire d'en ajuster la valeur. Dans ce dessein, nous avons dessiné tous les signaux sonores côte à côte et attribué des niveaux de gris aux valeurs d'intensité qui les composent, puis nous avons comparé visuellement les signaux sonores normalisés acquis à des altitudes différentes. Nous avons modifié les valeurs de taux d'absorption jusqu'à ce que les niveaux de gris attribués aux signaux obtenus à différentes altitudes soient uniformes. Nous avons alors considéré que nous avions ajusté les taux d'absorption sonore.

Puisque nous extrayons des variables du premier et du deuxième écho enregistrés (première et deuxième réflexion sur le substrat), tous les échantillons sonores n'incluant pas ce dernier segment ont été éliminés d'entrée de jeu. Puisqu'aucun standard industriel n'indique quelles variables permettent une description optimale d'un signal sonore, nous avons dans un premier temps basé notre choix sur des variables facilement interprétables et, dans un deuxième temps, tenté de conserver les variables les plus différentes les unes des autres. Deux jeux de variables ont été utilisés et testés. Le premier décrit principalement la forme du premier et du deuxième écho par l'entremise de variables extraites (VE) telles que les coefficients d'aplatissement et d'asymétrie, la distance entre les centroïdes de diverses sections de l'écho,

l'aire sous la courbe, etc. Le deuxième jeu de données (variables d'intensité, VI) utilise la série temporelle d'intensités centrées réduites du premier écho créée lors de la numérisation du signal sonore.

Pour chacune des 28 variables extraites (VE), nous avons sélectionné, parmi 4 transformations possibles, celle qui produisait les distributions les moins asymétriques. La transformation retenue différait d'une variable à l'autre. Pour l'ensemble des 92 variables d'intensité (VI), une seule transformation a été retenue parmi 11 transformations testées [DUR soumis] pour transformer les variables  $k_i$  en  $k_i$ :

$$p_j = k_j^{0.25} / max(k^{0.25})$$
  
 $k_j' = arcsinus(p_j^{0.5})$ 

 $(k_j^{0.25})$  représente la racine quatrième des valeurs d'une variable d'intensité  $(k_j)$  décrivant un écho, suivie d'une transformation en proportion  $(p_j)$  par rapport à l'intensité maximale du signal  $max(k^{0.25})$ , puis de la transformation arcsinus $(p_j^{0.5})$  [SOK 95]. Puisque nous avons divisé l'intensité des signaux sonores par leur valeur maximale, cette transformation ne conserve que la forme des échos comme source de variation.

## 3 Analyses et résultats

## 3.1 Transects verticaux

Afin d'évaluer le pouvoir de discrimination des variables formant les deux jeux de données (VI et VE), nous avons utilisé les enregistrements vidéo pour attribuer à chacun des signaux sonores un nom d'habitat parmi les cinq habitats dominants observés au site hydrothermal Clambed. Nous avons supprimé toutes les variables sonores ayant une variance intragroupe nulle ou une trop faible variance.

L'analyse des jeux de variables VI, VE, ainsi que l'union de ces deux groupes, fut réalisée de la façon suivante. 70 % des échantillons sonores (5352 signaux), tirés au hasard dans chaque habitat, furent utilisés pour construire un modèle prédictif à l'aide d'analyses discriminantes linéaires. Le pouvoir discriminant de chaque modèle fut évalué en termes de pourcentage de classification correcte des données restantes, soit 30 % ou 2293 signaux. En comparant les pourcentages de classification correcte obtenus pour les trois jeux de données, nous avons noté que l'utilisation conjointe des deux jeux de données dans la même analyse (VI et VE) pouvait améliorer les prédictions de 10 %. Puis, utilisant seulement ce jeu de variables, les signaux sonores furent séparés en fonction de leur altitude d'acquisition afin d'évaluer les effets qu'ont les variations de la taille de l'empreinte sonore sur la capacité de discrimination. À l'aide des 5706, 1499 et 441 échantillons retrouvés respectivement entre 1 et 4, 4 et 7, et 7 et 10 mètres. Les pourcentages de

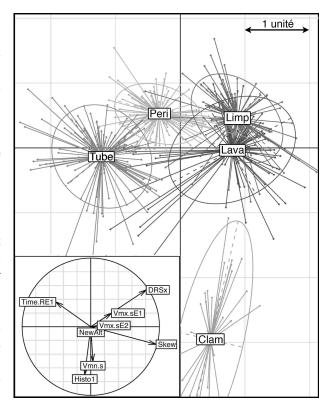


Figure 1. 30 % des échos échantillonnés à une altitude de 7 à 10 mètres projetés sur les deux premiers axes d'un modèle discriminant prédictif. Les variables VE dont les contributions aux axes (corrélations) sont illustrées en médaillon induisent la séparation des 5 habitats. L'espace discriminant est divisé en carrés de taille unité.

classification correcte obtenus étaient faibles pour les basses altitudes (70.4 et 68.4 %) et plus élevés pour les signaux obtenus au-delà de 7 mètres (84 %, Fig. 1). Cette grande différence supporte l'hypothèse que les variations de la taille de l'empreinte peuvent grandement influencer les résultats d'un survol sonore.

Afin de faciliter l'interprétation des résultats, après sélection ascendante pas à pas parmi les 120 variables dont nous disposions au départ, nous avons retenu 16 variables contribuant significativement à la discrimination. Malgré cette stricte sélection, les nouveaux pourcentages de classification correcte obtenus n'affichaient en moyenne qu'une baisse de 3 %. L'analyse plus approfondie des variables sélectionnées nous a permis non seulement d'identifier les caractéristiques propres à chaque signature sonore, mais aussi d'interpréter les signatures sonores en termes de texture et de densité.

## 3.2 Transect horizontaux

Après avoir démontré les capacités discriminantes des ondes sonores, il nous restait à montrer la capacité réelle des données sonores pour l'identification correcte des différents types d'habitats lors de survols horizontaux du champ de sources hydrothermales. Puisque nous avions le projet d'identifier visuellement les signatures sonores enregistrées en vue de l'analyse canonique de redondance (ACR), les transects furent survolés à une altitude variant d'un à cinq mètres ; une altitude plus élevée n'aurait pas permis d'identifier les habitats avec suffisamment de précision sur les enregistrements vidéo. À cette distance, le cône sonore sur le fond marin formait une empreinte variant de trois à quinze centimètres de diamètre. Au cours des 12 transects parcourant le site d'étude, nous avons enregistré en simultanéité 13676 signaux sonores et 90 minutes de survol vidéo. Dans un premier temps, nous avons calculé la moyenne des échos regroupés par intervalles d'une seconde et avons réalisé une description visuelle de la nature de l'aire de l'empreinte sonore, seconde par seconde. Une fois les données transformées et normalisées pour la profondeur et les variables sonores extraites, nous avons tenté de découvrir à quelles caractéristiques visuelles les différentes variables sonores semblaient être les plus sensibles. Par sélection ascendante pas à pas, un sous-groupe de variables visuelles fut extrait, puis utilisé dans une analyse de redondance qui a permis d'identifier à quels éléments du paysage sous-marin correspondaient les différentes variables sonores. Parce que les données sonores contiennent beaucoup de bruit, le coefficient de redondance bimultivariable de l'ACR est faible ( $R^2 = 10.4$  %). Il reste très hautement significatif (P = 0.001 après 1000 permutations). Les relations entre les variables visuelles et sonores illustrées à la Figure 2 sont en accord avec les relations habitats-variables sonores trouvées lors de l'analyse des transects d'altitude [DUR soumis].

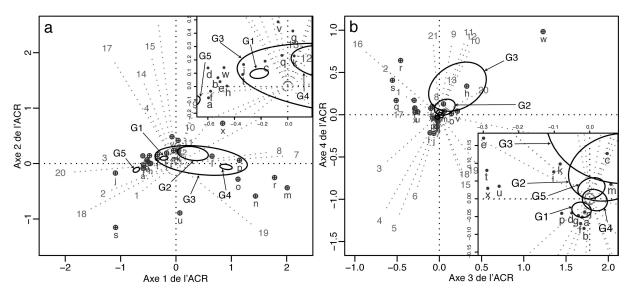


Figure 2. Projection des 21 variables sonores (variables VI: nos 1-13; variables VE: nos 14-21) et des 24 variables visuelles binaires (a à x) dans l'espace (a) des axes canoniques 1-2 et (b) des axes 3-4. Les cinq groupes (G1-G5) résultant de la partition par la méthode des K centroïdes sont représentés dans les graphiques par des ellipses de recouvrement à 95 %. À l'intérieur de chaque graphique, la zone centrale surchargée a été agrandie.

Nous avons ensuite partitionné les échos en 5 groupes de signaux sonores par la méthode des K centroïdes (K-means) [MAC 67] et retenu la solution présentant la plus faible variation intragroupe après 1000 démarrages aléatoires. Chaque groupe est représenté dans la Figure 2 par une ellipse de recouvrement à 95 %. Nous pouvons déterminer le type d'habitat représenté par chaque groupe (G1 à G5) en associant la position des ellipses aux variables visuelles (a à x) dans la figure. Cette étape était nécessaire pour nous permettre de cartographier les habitats détectés. Nos données de navigation contiennent cependant beaucoup d'erreur. Nous cherchons en ce moment à corriger ces données afin de pouvoir représenter sur une carte les différents groupes sonores que nous avons obtenus de la partition.

#### 4 Discussion et conclusion

En nous basant sur les résultats obtenus au cours de cette étude exploratoire, nous croyons que l'utilisation du sonar à des fins de cartographie et de télédétection représente une avancée majeure pour l'étude des habitats benthiques. À ce jour, le plus grave problème relié à cette technologie est que les ondes enregistrées dans un même habitat sont très variables. De nombreuses combinaisons de variables à extraire des ondes sonores sont possibles; elles n'ont pas encore été toutes créées ou testées. Afin de standardiser la méthode, nous devons chercher à identifier les combinaisons décrivant le plus adéquatement les divers échos sonores en vue de la cartographie des fonds marins. Parce que les basses fréquences pénètrent davantage le substrat, l'utilisation de plusieurs fréquences pourrait faire varier les signatures sonores provenant d'un même habitat et enrichir nos jeux de variables. Malgré l'augmentation du temps de calcul qui en résultera, l'utilisation conjointe de différentes fréquences sonores devrait permettre l'identification plus efficace des habitats benthiques, comme c'est le cas pour les différentes longueurs d'onde utilisées en télédétection terrestre.

Une des grandes sources de variance entre les échos est la variation de la taille de l'empreinte sonore sur le fond marin. Ces changements de taille de l'unité d'échantillonnage peuvent réduire grandement la capacité discriminante d'un jeu de données. Il est impératif que tout survol sonore respecte cette source de variation et tente de la minimiser. Ce ne sera qu'une fois cette méthode de télédétection bien établie et standardisée, que nous pourrons construire une banque de signatures sonores pouvant servir à l'identification des types d'habitats. Cela minimiserait les coûts associés à la validation visuelle des données sonores enregistrées au cours d'une mission.

## 5 Bibliographie

- [CLA 99] CLARKE P.A., HAMILTON L.J., *The ABCS Program for the analysis of echo sounder returns for acoustic bottom classification*, Report DSTO-GD-0215, Defence Science & Technology Organisation, Commonwealth of Australia, 1999.
- [DUR soumis] DURAND S., LEGENDRE P., JUNIPER S.K., "Sonar backscatter differentiation of dominant macrohabitat types in a hydrothermal vent field", *Ecological Applications*, soumis.
- [HAM 99] HAMILTON L.J., MULHEARN P.J., POECKERT R., "Comparison of RoxAnn and QTC-View acoustic bottom classification system performance for the Cairns area, Great Barrier Reef, Australia", *Continental Shelf Research* vol. 19, 1999, p. 1577-1597.
- [MAC 67] MacQUEEN J., "Some methods for classification and analysis of multivariate observations", in: Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Le Cam L.M., Neyman J., editors, University of California Press, Berkeley, vol. 1, p. 281-297, 1967.
- [SOK 95] SOKAL R.R., ROHLF F.J., Biometry The principles and practice of statistics in biological research, Third Edition, W.H. Freeman, New York, 1995.