



HAL
open science

Caractérisation des fonds lacustres par hydroacoustique Une nouvelle méthode opérationnelle pour la surveillance environnementale

Anne Mouget, Jean Guillard, Jean-Marc Baudouin, Christine Argillier

► **To cite this version:**

Anne Mouget, Jean Guillard, Jean-Marc Baudouin, Christine Argillier. Caractérisation des fonds lacustres par hydroacoustique Une nouvelle méthode opérationnelle pour la surveillance environnementale. Cahier des Techniques de l'INRA, 2017. <hal-03043505>

HAL Id: hal-03043505

<https://hal.inrae.fr/hal-03043505v1>

Submitted on 7 Dec 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Caractérisation des fonds lacustres par hydroacoustique

Une nouvelle méthode opérationnelle pour la surveillance environnementale

Anne Mouget¹, Jean Guillard², Jean-Marc Baudouin³, Christine Argillier⁴

Résumé. Le substrat est une composante de la morphologie lacustre importante pour les biocénoses et le fonctionnement global des milieux lacustres. Sa caractérisation peut se faire soit par les méthodes traditionnelles (prélèvements à la benne, caméras étanches) qui ne permettent que des mesures ponctuelles, soit à l'aide d'échosondeurs, qui présentent l'avantage de produire une caractérisation plus large, à l'échelle de l'écosystème et qui sont non intrusifs. Nous présentons ici un protocole de caractérisation des substrats lacustres par hydroacoustique, reposant sur l'utilisation du système RoxAnn[®], peu coûteux et d'utilisation relativement simple pour les gestionnaires, acteurs de l'eau, scientifiques... Nous décrivons succinctement les principes généraux et les différentes étapes de la méthode, depuis la mise en place du matériel sur le bateau jusqu'au traitement des données qui a fait l'objet d'un développement analytique. Cette méthode permet de décrire la nature des substrats des fonds et de les cartographier sans qu'aucune compétence particulière ne soit requise lors du traitement des données. Ces informations ainsi cartographiées peuvent permettre un suivi de l'évolution des fonds dans un écosystème donné. À terme, elles pourront être intégrées dans des indicateurs plus informatifs de la qualité ou diversité des substrats dans une perspective de description plus fonctionnelle ou d'analyse des réponses des biocénoses à leur environnement plus ou moins perturbé.

Mots clés : hydroacoustique, substrats lacustres, caractérisation, RoxAnn

Introduction

Les caractéristiques hydromorphologiques des écosystèmes lacustres, et en particulier les caractéristiques des substrats, sont considérées comme des facteurs de contrôle de la biodiversité aquatique (Gob et al., 2014). Les substrats qui tapissent les fonds ont en effet une influence sur les habitats potentiels pour les biocénoses (Murphy et al., 1996; Cholwek et al., 2000; Orr et al., 2008). La nature des fonds agit également sur les processus biogéochimiques et en conséquence sur le fonctionnement des écosystèmes (Colas et al., 2017; Elosegí et al., 2010).

La connaissance de ces caractéristiques morphologiques peut ainsi être utilisée dans la détermination de la qualité écologique des plans d'eau, à l'échelle de l'écosystème ou de zones particulières telles que par exemple l'envasement de certaines zones de frayères. Cette caractérisation peut ainsi s'avérer être un élément central pour comprendre des effondrements de populations de poissons liés à la dégradation des zones de reproduction (Creque et al., 2010). Par ailleurs, la mise en œuvre de la Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE), adoptée par le Parlement européen en 2000 (European Commission 2000), a intégré cette nécessité de décrire la morphologie des hydrosystèmes et impose une caractérisation de la nature des fonds dans l'évaluation de l'état

¹ INRA, Irstea, 75 bis avenue de Corzent, CS 50511, 74203 Thonon-les-Bains Cedex, France
anne.mouget@hotmail.fr

² INRA, UMR CARRTEL, 75 bis avenue de Corzent, CS 50511, 74203 Thonon-les-Bains Cedex, France

³ AFB, Pôle AFB/Irstea, Hydroécologie des plans d'eau, 3275 route de Cézanne, CS 40061, 13182 Aix-en-Provence Cedex 5, France

⁴ Irstea, UR RECOVER, Pôle AFB/Irstea Hydroécologie des plans d'eau, 3275 route de Cézanne, CS 40061, 13182 Aix-en-Provence Cedex 5, France

écologique des écosystèmes lacustres. Dans ce contexte, la nature des substrats lacustres est considérée comme un paramètre de support de la biologie, et donc globalement comme un élément du bon fonctionnement des écosystèmes.

Contrairement aux milieux lotiques généralement de faible profondeur, les lacs peuvent être très profonds, ce qui impose de fortes contraintes méthodologiques pour observer et cartographier les fonds, dans la plupart des cas non visibles depuis la surface. Pour faire face à ces contraintes, différentes méthodes ont été développées.

Complémentaire des méthodes d'observation usuelles (prélèvements à la benne, caméra) qui ne permettent que des mesures ponctuelles, l'utilisation des échosondeurs permet une mesure en continu des substrats, donc une large couverture du plan d'eau, et n'est pas intrusive (Poulain et al., 2011). L'échosondage est basé sur la diffusion des ondes sonores dans la colonne d'eau, propriété utilisée pour répondre à différents objectifs, notamment pour quantifier la biomasse des poissons (Guillard et Lebourges-Dhaussy, 2014). La détermination de la nature des substrats par échosondage repose sur les travaux d'Orlowski (1986) qui propose d'utiliser les caractéristiques des deux premiers échos de l'onde sonore renvoyée par le fond. Cette technique est très répandue dans des travaux de recherches sur les habitats en milieu marin, mais aussi en milieu lacustre (Hamilton et al., 1999; Mielck et al., 2014). L'intérêt de cette méthode a conduit au développement d'approches « clef en main » destinés aux communautés d'acteurs travaillant sur les écosystèmes aquatiques. L'échosondeur RoxAnn GD-X® est un système commercial vendu avec un échosondeur mono-faisceau, son transducteur, ainsi qu'un logiciel de traitement des données en temps réel (RoxMap32). Ce système est particulièrement adapté aux milieux lacustres de par son faible coût, sa facilité de mise en œuvre et ses dimensions réduites. En revanche, RoxMap32 ne permet qu'une estimation imparfaite de la nature des substrats (Chevillon 2001; Poulain et al., 2010), due à la méthode de classification utilisée et à la précision induite. Ainsi, cette phase d'analyse des données acoustiques a été modifiée pour améliorer la qualité des résultats (Mouget et al., 2017).

Cet article a pour objectif de présenter un protocole de caractérisation des substrats lacustres par hydroacoustique, peu coûteux et d'utilisation simple pour les gestionnaires, acteurs de l'eau et scientifiques, reposant sur l'utilisation du système RoxAnn®. Les principes généraux et les différentes étapes de la méthode sont décrits succinctement, depuis la mise en place du matériel sur le bateau jusqu'au traitement des données.

Principes de fonctionnement des échosondeurs et présentation de RoxAnn

Un échosondeur est un appareil utilisant les propriétés de diffusion des ondes dans l'eau. Le système échosondeur-transducteur (**Figure 1**) émet des ondes acoustiques qui vont être réfléchies, sous la forme d'un premier écho, par les cibles rencontrées (poisson ou substrat du fond par exemple). Ce premier écho va alors être récupéré par le transducteur, qui agit comme émetteur-récepteur, puis va être analysé. Cet écho va aussi être réfléchi par la surface de l'eau et en atteignant une deuxième fois le fond, va être à nouveau renvoyé pour produire un second écho, également capté par le système. Chaque cible possède des caractéristiques propres particulières (forme, volume, densité, etc.) qui vont déterminer les caractéristiques intrinsèques des échos et permettre, après analyse, d'identifier sa nature. Les méthodes d'identification de la nature des fonds par acoustique utilisent généralement deux valeurs d'énergie qui sont E1, issue de la deuxième moitié du premier écho et E2, la totalité du deuxième écho (**Figure 2**). E1 est caractéristique de la rugosité et E2 de la dureté du substrat (Orlowski, 1986). La rugosité est à rattacher à la granulométrie du substrat tandis que la dureté fait référence à son degré de compaction.

Le transducteur doit être mis en place en position strictement horizontale afin que les ondes envoyées suivent une trajectoire la plus verticale possible. Dans le cas contraire, la profondeur peut être faussée et l'estimation de la nature du substrat, moins précise, n'est plus située exactement sous le bateau. Le transducteur doit être en permanence immergé lors de son utilisation ; il est donc conseillé de le placer à 40 cm sous la surface.

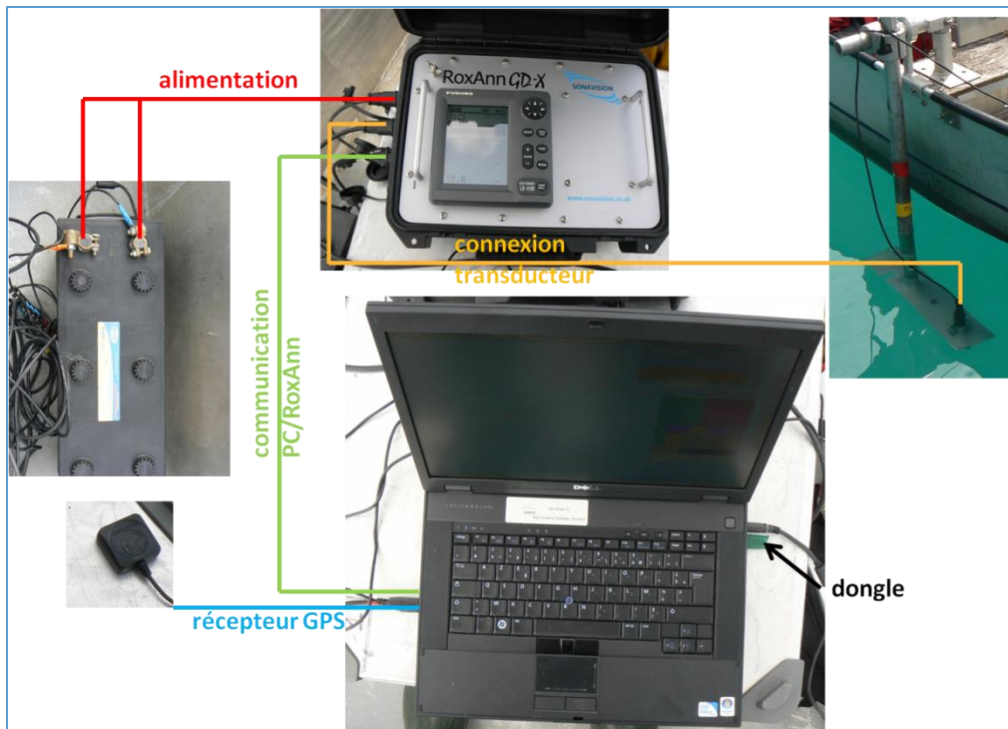


Figure 1. Matériel composant le système RoxAnn® (photos : Poulain, Argillier, et Guillard 2010).

Le système RoxAnn® utilisé pour caractériser les substrats prévoit l'utilisation possible de deux fréquences : 50 et 200 kHz. Il est recommandé de choisir la fréquence 200 kHz qui permet d'avoir une meilleure définition des substrats (Poulain et Guillard, 2011). La durée entre chaque ping (environ 1 seconde) est gérée par le système et ne nécessite donc aucun réglage. Un logiciel spécifique, RoxMap32, récupère les informations des énergies E1 et E2 et donne en temps réel une estimation de la nature du substrat, ainsi que la profondeur. La durée entre chaque ping n'est pas réglable, c'est un paramètre qui est géré automatiquement en fonction de la profondeur. Ces informations sont géolocalisées grâce aux informations issues d'un GPS couplé au système RoxAnn® (Figure 2).

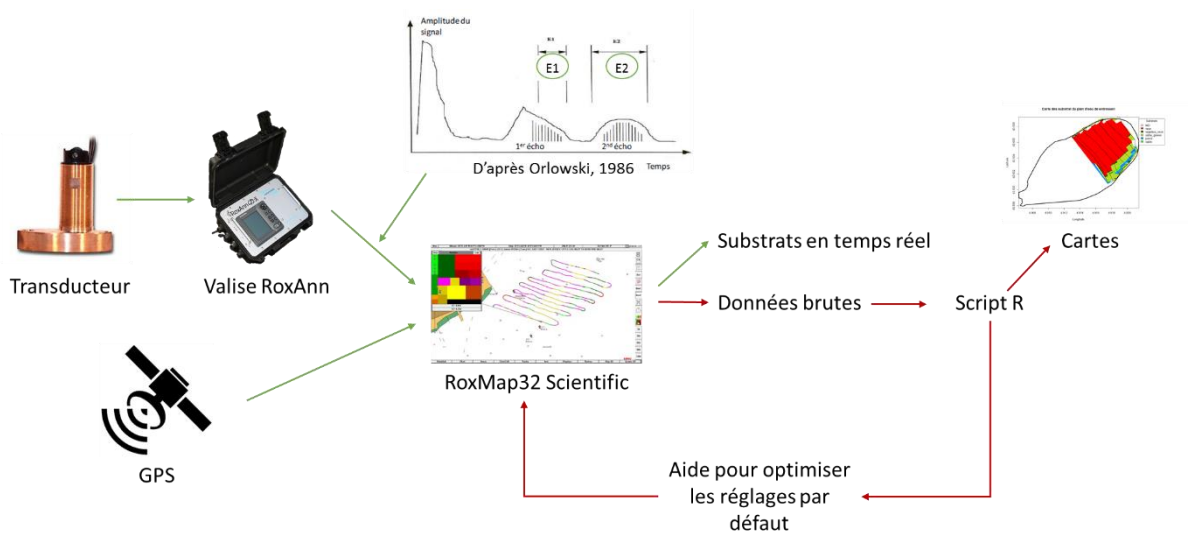


Figure 2. Schéma du fonctionnement global du système RoxAnn® et du protocole de traitement des données développé (flèches en vert : sur le terrain, en rouge : lors du traitement a posteriori).

L'utilisation du système RoxAnn® peut donc être divisée en plusieurs phases. La première consiste à calibrer le système, la deuxième à acquérir des données selon un plan d'échantillonnage précis. Ces données sont ensuite traitées dans une dernière phase.

Phase de calibration

Une pré-calibration électrique des instruments, préalable à toute acquisition de données, est à réaliser sur une surface plane, meuble, type sable fin ou vase, située à environ 15-25 mètres de profondeur (Ehrhold, 2004). Cette opération est à répéter avant chaque campagne d'échantillonnage (Sonavision, 2006). L'imprécision de cette calibration peut au final entacher d'erreur la comparaison directe des valeurs d'énergies (E1 ; E2).

Pour éviter les imprécisions sur la description des substrats, nous préconisons également une calibration des différents types de substrat pour chaque lac. Cette étape est donc complémentaire de la pré-calibration électrique décrite précédemment. Afin d'établir le lien entre les données acoustiques et la donnée terrain, les substrats doivent être identifiés soit par prélèvement à la benne, soit par visualisation directe par caméra. Il est nécessaire de réaliser au moins un enregistrement par type de substrat, mais un deuxième (à une autre profondeur par exemple) permet d'améliorer significativement la robustesse du modèle dans la phase de traitement des données. Sans cette phase de calibration, le modèle ne sera pas capable de décrire avec précision la nature des substrats lacustres. Dans le cas où aucune connaissance préalable de la distribution des substrats sur le fond de la cuvette n'est disponible, les différents types de substrats peuvent être repérés avec RoxMap32 pendant la phase d'acquisition des données. Ce repérage n'est pas utilisé dans la caractérisation des substrats, mais permet uniquement de sélectionner des zones pouvant être utilisées potentiellement pour la calibration. Il faudra ensuite retourner sur les différentes zones identifiées afin de réaliser *a posteriori* une calibration des différents types de substrat. Dans tous les cas, les substrats qui n'auraient pas pu être calibrés seront affichés comme « indéterminés ».

Acquisition des données

Principes généraux

L'acquisition des données doit se faire à une vitesse constante d'environ 7 km.h⁻¹ soit 3,8 nœuds avec un enregistrement par seconde, ce qui représente un peu moins de 2 m entre chaque point. Au-delà de cette vitesse, les points sont plus espacés mais les résultats restent fiables tant que la vitesse n'excède pas 8 nœuds (Poulain et Guillard, 2011). En deçà de 3,8 nœuds, les zones échantillonnées se recoupent, ce qui n'apporte pas d'information supplémentaire et augmente le temps de parcours total. Le bateau doit également être le plus stable possible afin de garder le transducteur horizontal.

Les profondeurs trop faibles (inférieures à 1,5 m) présentent un risque pour le matériel et à de telles profondeurs, une saturation du signal est observée (Poulain et Guillard, 2011). Dans le cas d'une profondeur trop importante (supérieure à 35-40 m), le signal présente des incohérences. Il est donc conseillé de limiter l'échantillonnage aux zones dont la profondeur est comprise entre 1,5 et 35-40 m (Poulain et Guillard, 2011). Il est impératif d'établir au préalable une stratégie d'échantillonnage en fonction de l'écosystème échantillonné (notamment de sa taille et de sa profondeur) et des objectifs de l'observation (caractérisation de l'ensemble du lit ou suivi d'une zone restaurée par exemple).

Lors de l'acquisition des données, le système affiche en temps réel la trajectoire du bateau, la profondeur et une estimation de la nature des substrats échantillonnés sous forme de données qualitatives.

Clefs pour l'établissement d'une stratégie d'échantillonnage

Dans le cas d'une observation des substrats sur l'ensemble d'un plan d'eau, une stratégie d'échantillonnage conseillée (Poulain et Guillard, 2011; Alleaume et al., 2010) est d'effectuer un parcours comprenant des transects perpendiculaires à la plus grande longueur, complétés par 1 à 3 radiales centrales parallèles à la plus grande longueur, ainsi qu'un échantillonnage du pourtour du lac. La distance inter-transects est la principale composante de l'effort d'échantillonnage, dont l'optimum résulte d'un compromis entre le temps nécessaire à l'acquisition des données et la qualité des résultats attendus, eux-mêmes liés aux objectifs de l'étude, aux moyens humains et financiers disponibles et à la surface à couvrir. D'une manière générale, l'effort d'échantillonnage sera d'autant plus important que la distribution des substrats de fond est hétérogène, mais la définition de cet effort nécessite donc une connaissance minimale préalable de la nature des fonds.

Une estimation du temps nécessaire à la réalisation d'un tel échantillonnage a été réalisée pour un certain nombre de lacs pour des espacements inter-transects de 100 et 200 m, une centrale radiale unique et un échantillonnage du pourtour du lac (**Tableau 1**).

Tableau 1. Estimation des temps d'échantillonnage théoriques pour quelques lacs

Nom du plan d'eau	Surface (km ²)	Profondeur maximale (m)	Forme	Estimation du temps d'échantillonnage théorique à 7 km.h ⁻¹	
				Espacement inter-transect de 100 m	Espacement inter-transect de 200 m
Etang d'Entressen	0,91	8	Régulière	2 h	1 h 30
Lac de Pareloup	12,3	40	Irrégulière	31 h	23 h
Lac du Bourget	44,5	145	Régulière	42 h	27 h 30
Lac du Der-Chantecoq	48	18	Irrégulière	68 h 30	46 h 30

Une autre étude visant à identifier la perte d'information relative à l'espacement des transects a été menée sur une partie du lac du Bourget (Mouget et al., 2017). Les auteurs montrent qu'un espacement inter-transects de 100 m conduit à une conservation d'environ 85% de l'information par rapport à une distance inter-transects très faible (25 m). Ce pourcentage est réduit à 80% dans le cas d'un espacement inter-transects de 200 m. Il faut toutefois noter que ces conclusions peuvent s'avérer difficilement transposables dans un contexte de substrats très hétérogènes.

Traitement des données

Les données enregistrées le long de la trajectoire ainsi définie doivent ensuite être traitées. Le taux d'adéquation avec le substrat des données issues des réglages par défauts étant seulement de 44% dans l'étude menée par Poulain et Guillard (2011), un autre traitement de données a été défini (Mouget et al., 2017). Celui-ci permet également l'export de cartes complètes, ce que ne permet pas Roxmap32.

Les données enregistrées par RoxAnn© peuvent être exportées au format texte. Le traitement des données s'effectue via un script développé sous le logiciel « R » (R Core Team 2016), qui ne nécessite aucune compétence particulière, contrairement à l'utilisation de certains logiciels de SIG (système d'Information géographique). La

Figure 2 présente le schéma du fonctionnement conjoint du système RoxAnn© et du traitement de données proposé. En sorties, une carte de bathymétrie du plan d'eau et une carte de répartition des substrats sont générées. La carte de bathymétrie est obtenue en réalisant une interpolation linéaire entre les différents points de mesures. Le script permet d'affiner la prédiction des substrats de RoxMap32 en utilisant une méthode d'apprentissage supervisée basé sur la calibration *in situ* précise et prenant en compte, non seulement les énergies E1 et E2 comme le fait RoxMap32, mais aussi la bathymétrie. L'ajout de cette nouvelle variable permet d'améliorer la discrimination des substrats (**Figure 3**).

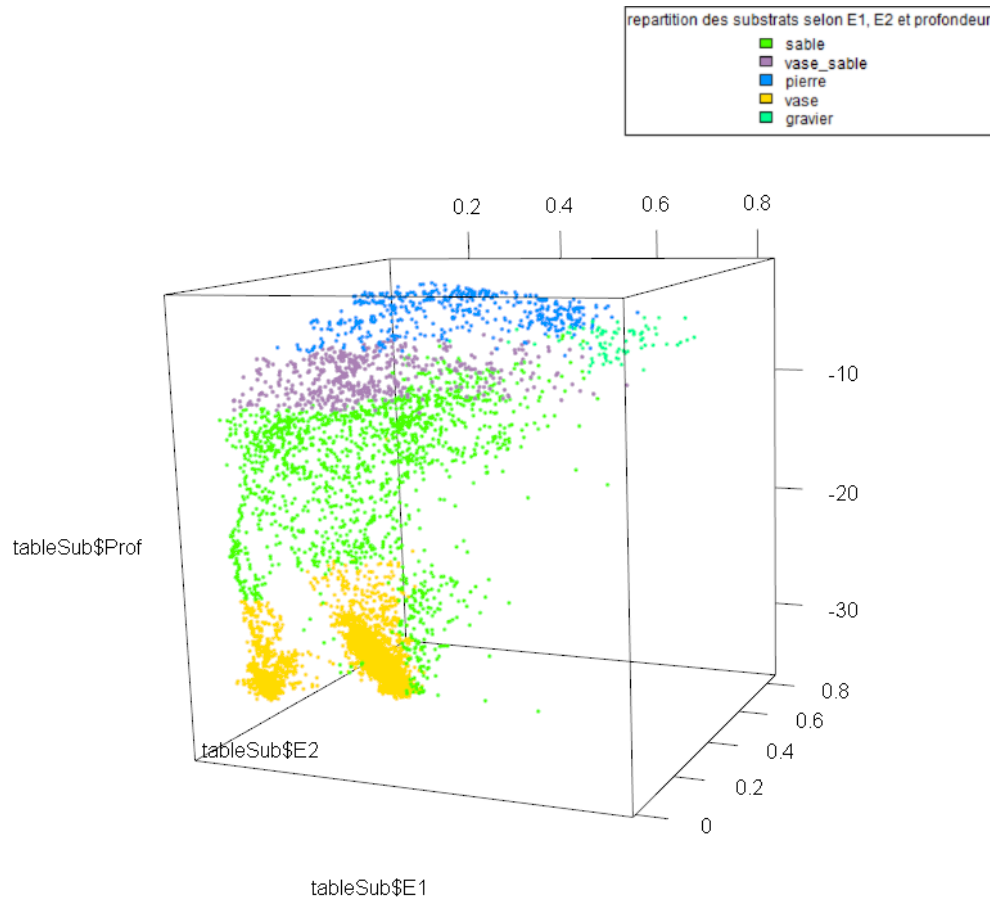


Figure 3. Répartition des substrats selon les trois variables utilisées

Un modèle de forêt d'arbres décisionnels (random forest), basé sur le jeu de calibration, permet d'associer à chaque triplet mesuré (E1 ; E2 ; profondeur) une nature de substrat. Les substrats sont ainsi estimés le long de la trajectoire. Une estimation de l'efficacité du modèle est fournie par le script. Afin d'obtenir une cartographie de la nature des fonds sur l'ensemble du lac, il faut ensuite estimer les substrats dans les zones non mesurées par interpolation. Cependant, des variables qualitatives ne peuvent être interpolées directement. Des cartes de présence/absence sont donc créées pour chaque substrat. Ce sont ces données, constituées de 0 et de 1, qui sont interpolées pour constituer des cartes de probabilité de présence. Ces cartes sont ensuite compilées en une unique carte de répartition des substrats. Ce script complémentaire des données issues du système RoxAnn©, permet donc une interpolation des résultats pour une cartographie complète des substrats à l'échelle du plan d'eau, ce que ne fait pas le logiciel constructeur, mais en traitement *a posteriori* et non en temps réel. Le script utilise les données cartographiques de la base Carthage (« Sandre - Portail national d'accès aux référentiels sur l'eau » 2017) contenant la majorité des plans d'eau français, ce qui permet au script de pouvoir générer des cartes de zones très diverses.

Exemples de résultats obtenus en application de la méthode décrite

Cartes de bathymétrie et de répartition des substrats

La carte de la bathymétrie (**Figure 4a**) affiche les profondeurs par classe et la trajectoire du bateau lors de l'échantillonnage. La carte de répartition des substrats (**Figure 4b**) affiche également la trajectoire mais aussi les points de calibration en plus des substrats prédits.

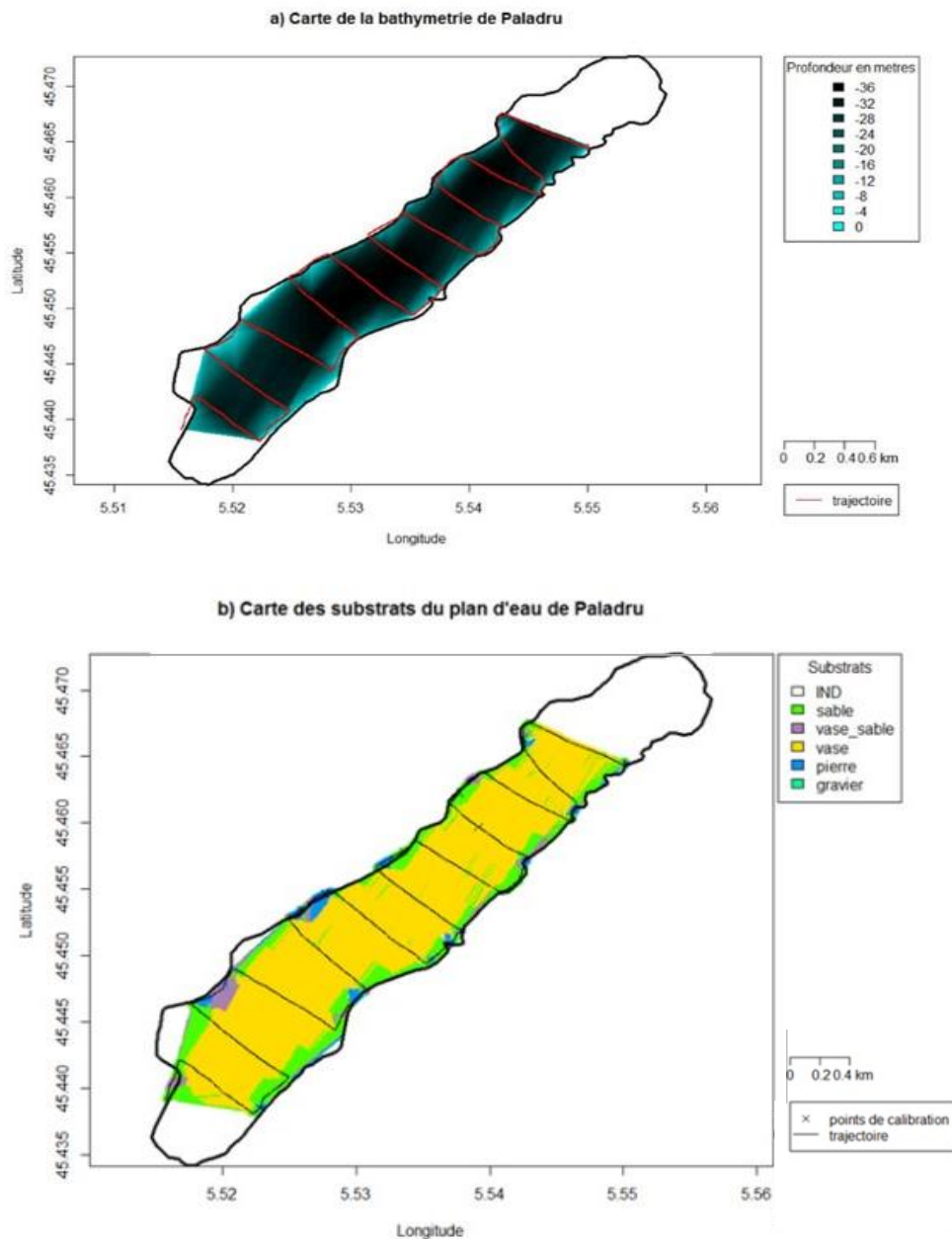


Figure 4. Exemples de cartes obtenues avec le traitement par le script R (obtenues sur le lac de Paladru). **a)** Carte de bathymétrie ; **b)** Carte de répartition des substrats.

La carte de répartition des substrats (**Figure 4b**) présente les substrats ayant une probabilité de présence supérieure ou égale à 50% (seuil modifiable). Lorsque deux substrats ont une probabilité de présence supérieure ou égale à 50%, ils sont notés substrat1_substrat2. Le « _ » est à lire comme un « et/ou ». La catégorie « IND » représente les substrats indéterminés. Ceci peut apparaître lorsqu'aucun substrat n'atteint la probabilité de 50% ou dans le cas d'un substrat n'existant pas dans la base de calibration. Il est à noter que la légende utilisée est commune à tous les plans d'eau. Ceci permet de faciliter la comparaison de données, lors de suivis par exemple. Lors de la création de cette carte, une matrice est également créée et enregistrée au format CSV, renseignant en chaque point le substrat estimé. Ce tableau peut ainsi être de nouveau analysé ou utilisé dans d'autres modèles.

Dans le cas d'échantillonnage incomplet, l'interpolation, qui n'a pas de limite de distance, peut donner des résultats sans réalité physique. Une imprécision des données GPS et/ou du fond de carte peut également conduire à un léger décalage entre les points et le fond de carte.

Conclusion

Le système RoxAnn© s'avère être un outil particulièrement adapté à la description des substrats en milieu lacustre de par son coût et la facilité de sa mise en œuvre. Son utilisation présente cependant des limites, les profondeurs échantillonnées devant être comprises entre 1,5 et 40 m, et l'acquisition des données pouvant s'avérer chronophage dans le cas de grands lacs. Cependant, dans les zones très profondes, le substrat est majoritairement composé de vase, ce qui est dû au phénomène de sédimentation et à l'éloignement des berges (Pourriot et Meybeck, 1995) ; en deçà de 1,5 m, d'autres méthodes peuvent être utilisées comme l'observation directe ou la mise en œuvre du protocole Charli (Alleaume et al., 2013). La limite d'utilisation pour les fortes profondeurs est donc peu contraignante sauf dans quelques cas particuliers. Par ailleurs, dans le cas des grands lacs, l'effort d'échantillonnage peut être réduit par une augmentation de l'espacement inter-transect dans la zone centrale ou les zones de substrats homogènes.

Le traitement des données permet une certaine répétabilité, mais sa fiabilité découle de la qualité des données d'entrées. La calibration est ainsi une étape indispensable.

La partie méthodologique développée pour le traitement des données (Mouget et al., 2017) permet d'améliorer la fiabilité des prédictions de substrat sans requérir de compétences particulières et de produire des cartes de répartition des substrats.

La connaissance de la nature des différents substrats est un élément important pour appréhender la qualité des écosystèmes. La cartographie avec les occurrences des différents substrats est en soi un élément d'aide à la connaissance. Ces cartes, souvent très démonstratives pour des gestionnaires, peuvent se révéler utiles pour suivre des épisodes d'envasement ou l'efficacité de certaines mesures de restauration des substrats de certaines zones par exemple. Ces méthodes sont également transposables dans d'autres types de milieux aquatiques, comme en mer où elles sont déjà très utilisées et en fleuve, lorsque la profondeur est suffisante. En fleuve, la calibration est parfois rendue complexe à cause des courants importants qui rendent difficile le positionnement en point fixe.

Les données cartographiques peuvent également être utilisées pour quantifier différentes catégories des habitats potentiels ou des zones favorables aux biocénoses et/ou aux processus écosystémiques. Elles peuvent servir de support au développement d'indicateurs plus informatifs de la diversité ou de l'hétérogénéité des substrats, avec ou sans pondération liée à leur attractivité pour les biocénoses. Pour cela, les indices associés à l'écologie du paysage pourraient être mobilisés (Le Pichon et al., 2009; Uemaa et al., 2009). Il s'agit ici d'une étape importante

qui reste à conduire afin de disposer d'un indicateur de l'état du substrat notamment dans la perspective d'une évaluation complète de l'état écologique des plans d'eau requise par la DCE.

Références bibliographiques

Alleaume S, Lanoiselee C, Argillier C (2010) Bathymétrie des plans d'eau Protocole d'échantillonnage et descripteurs morphométriques. Rapport scientifique ONEAM-CEMAGREF.

<http://cemadoc.irstea.fr/oa/PUB00030582-bathymetrie-des-plans-eau-protocole-echantillonnag.html>

Alleaume S, Lanoiselee C, Heyd C, Argillier C (2013) Charli : protocole de caractérisation des habitats des rives et du littoral. Rapport ONEMA. http://www.onema.fr/sites/default/files/rapport_irstea2012-3_charli.pdf

Chevillon C (2001) Caractérisation des types de fonds et habitats benthiques par classification hydro-acoustique dans le lagon Sud-Ouest de Nouvelle-Calédonie. *Rapport IRD*.

Cholwek G, Bonde J, Xing L, Richards C, Yin K (2000) Processing RoxAnn Sonar Data to Improve Its Categorization of Lake Bed Surficial Substrates†. *Marine Geophys Res* **21 (5)** : 409- 21.

doi:10.1023/A:1026525326823.

Colas F, Baudoin JM, Gob F, Tamisier V, Valette L, Kreutzenberger K, Lambrigot D, Chauvet E (2017) Scale dependency in the hydromorphological control of a stream ecosystem functioning. *Water Res* **113** : 1- 14.

Creque SM, Stainbrook KM, Glover DC, Czesny SJ, Dettmers JM (2010) Mapping bottom substrate in Illinois waters of Lake Michigan: Linking substrate and biology. *J Great Lakes Res* **36 (4)** : 780- 89. doi:10.1016/j.jglr.2010.08.010.

Ehrhold A (2004) Projet REBENT : cartographie des habitats benthiques dans les petits fonds côtiers à l'aide de méthodes acoustiques. *Phd thesis*, Université de Caen. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00006680/document>.

Elosegi A, Diez J, Mutz M (2010) Effects of hydromorphological integrity on biodiversity and functioning in river ecosystems. *Hydrobiologica*. **657** : 199-215. doi:10.1007/s10750-009-0083-4.

European Commission (2000) Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 Establishing a Framework for Community Action in the Field of Water Policy.

Gob F, Bilodeau C, Thommeret N, Belliard J, Albert MB, Tamisier V, Baudoin JM, Kreutzenberger K (2014) Un outil de caractérisation hydromorphologique des cours d'eau pour l'application de la DCE en France (CARHYCE) *Géomorphologie : relief, processus, environnement* **20 (1)** : 57- 72. doi:10.4000/geomorphologie.10497.

Guillard J, Lebourges-Dhaussy A (2014) Au cœur des bancs de poissons. *Pour la Science* **436** : 38- 45.

Hamilton LJ, Mulhearn PJ, Poeckert R (1999) Comparison of RoxAnn and QTC-View acoustic bottom classification system performance for the Cairns area, Great Barrier Reef, Australia. *Continental Shelf Res* **19 (12)** : 1577- 97. doi:10.1016/S0278-4343(99)00020-5.

Le Pichon C, Gorges G, Baudry J, Goreaud F, Boët P (2009) Spatial Metrics and Methods for Riverscapes: Quantifying Variability in Riverine Fish Habitat Patterns. *Environmetrics* **20 (5)** : 512- 26. doi:10.1002/env.948.

Anne Mouget, Jean Guillard, Jean- Marc Baudouin, Christine Argillier

Mielck FI, Bartsch HC, Hass AC, Wöfl DB, Betzler C (2014) Predicting spatial kelp abundance in shallow coastal waters using the acoustic ground discrimination system RoxAnn. *Estuarine, Coastal Shelf Sci* **143** : 1- 11. doi:10.1016/j.ecss.2014.03.016.

Mouget A, Argillier C, Dublon J, Guiton F, Poulain T, Ruiz P, Guillard (2017) Protocole d'utilisation du système RoxAnn© pour la classification des fonds lacustres. *rapport INRA-Irstea-AFB*. <http://www6.dijon.inra.fr/thonon/La-communication/Documents-synthetiques/RoxAnn-protocole-d-utilisation-du-systeme>.

Murphy L, Leary T, Williamson A (1996) Standardizing Seabed Classification Techniques. *Oceanogr Lit Rev* **3 (43)** : 245.

Orlowski A (1986) Application of multiple echoes energy measurements for evaluation of sea bottom type. *Deep Sea Res Part B. Oceanogr Lit Rev* **33 (3)** : 223. doi:10.1016/0198-0254(86)91089-7.

Orr HG, Large ARG, Newson MD, Walsh CL (2008) A predictive typology for characterising hydromorphology. *Geomorphology, Fluvial Systems: Dynamics, Morphology and the Sedimentary Record Special Issue in honour of Adrian Harvey* **100 (1-2)** : 32- 40. doi:10.1016/j.geomorph.2007.10.022.

Poulain T, Argillier C, Guillard J (2010) Classification des fonds lacustres par hydroacoustique. *Rapport bibliographique. ONEAM-CEMAGREF*.

Poulain T, Guillard J (2011) Etude de performances du système hydroacoustique RoxAnn GD-X permettant de faire de la classification des substrats subaquatiques : RoxAnn GD-X. *Rapport ONEMA-INRA*.

Pourriot R, Meybeck M (1995) *Limnologie générale*. Masson, Paris, France.

R Core Team (2016) R: a language and environment for statistical computing (version R version 3.3.2). Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>.

Sandre - Portail national d'accès aux référentiels sur l'eau (2017) Consulté le 30 janvier 2017. <http://www.sandre.eaufrance.fr/>.

Sonavision (2006) RoxAnn GD - Quick Installation Guide. http://www.sonavision.co.uk/cust_images/products/products/manual_pdfs/5249-31-0021_roxann_gd_quick_guide.pdf.

Uuemaa E, Antrop M, Roosaare J, Marja R, Mander Ü (2009) Landscape Metrics and Indices: An Overview of Their Use in Landscape Research. *Living Rev landscape Res* **3 (1)** : 1- 28.