

Protocole d'utilisation du système RoxAnn[®] pour la classification des fonds lacustres

Rapport final

MOUGET Anne (INRA - IRSTEA)
ARGILLIER Christine (IRSTEA)
DUBLON Julien (IRSTEA)
GUITON François
POULAIN Thomas
RUIZ Philippe
GUILLARD Jean (INRA)

Mai 2017

En partenariat avec :



Avec le soutien de l'AFB

**AGENCE FRANÇAISE
POUR LA BIODIVERSITÉ**

Établissement public du ministère de l'Environnement

- **AUTEURS**

Anne MOUGET, ingénieur (INRA), anne.mouget@inra.fr

Christine ARGILLIER, directrice de recherche (IRSTEA), christine.argillier@irstea.fr

Julien DUBLON, ingénieur d'études (IRSTEA), julien.dublon@irstea.fr

François GUITON, ingénieur d'études

Thomas Poulain, ingénieur d'études, thomas.poulain1984@gmail.com

Philippe Ruiz, ingénieur d'études

Jean Guillard, ingénieur de recherche (INRA), jean.guillard@inra.fr

- **CORRESPONDANTS**

Jean-Marc Baudouin, responsable du pôle AFB-IRSTEA (IRSTEA), jean-marc.baudoin@irstea.fr

Droits d'usage : accès libre

Niveau géographique : national

Couverture géographique : France

Niveau de lecture : professionnels, experts

- **RESUME**

La Directive Cadre sur l'Eau préconise l'atteinte du bon état écologique des plans d'eau ainsi que leur suivi, ce qui implique une connaissance de la nature des fonds. En complémentarité des méthodes usuelles (prélèvements à la benne, caméra étanche), qui ne permettent que des mesures ponctuelles, se présentent les échosondeurs. Celui utilisé dans ce document est le modèle RoxAnn GD-X®, fourni avec son propre échosondeur et transducteur mono-faisceau et d'un logiciel de traitement des données.

Ce rapport a pour objectif de proposer un protocole complet de l'utilisation du système RoxAnn GD-X®, de la mise en place du système au traitement des données pour obtenir une cartographie des substrats dans un plan d'eau. Ce protocole a été éprouvé sur près de 40 lacs échantillonnés. Ce document propose une aide pour la mise en place du matériel, un protocole d'acquisition des données de cartographie et de calibration puis le traitement des données acquises. Ce dernier point s'effectue de manière automatique par un script R et permet d'obtenir des cartes de bathymétrie, de répartition des substrats ainsi qu'un soutien pour optimiser les réglages par défaut du système RoxAnn®. La nature des fonds mesurés est prédite en établissant, avec les données de calibration, une relation entre l'énergie récupérée (E1 et E2), la profondeur et un type de substrat. E1 est la deuxième partie de l'énergie du premier écho et reflète la rugosité tandis que E2, l'énergie du deuxième écho, informe sur la dureté du substrat. Une fois le substrat prédit pour les points mesurés, une interpolation est réalisée pour estimer la nature du fond sur la totalité de la zone étudiée.

Pour compléter ce protocole, deux tutoriels vidéo ont été créés et est accessible sur le lien suivant :

<https://www.youtube.com/watch?v=YbnXQdL3i8Q&feature=youtu.be>

<https://www.youtube.com/watch?v=VUkdbR0GZ5w&t=4s>

- **MOTS CLES (THEMATIQUE ET GEOGRAPHIQUE)**

Analyse acoustique, échosondeur mono-faisceau, fonds lacustres, RoxAnn®, substrats lacustres, cartographie.

USE OF ROXANN® SYSTEM TO CLASSIFY LAKE BOTTOM

Final report

- **ABSTRACT**

The Water Framework Directive recommends to reach a good ecological status of water bodies and to follow it, what involves the knowledge of the bottom nature. Common methods (grab sampling, waterproof camera) give only point measures, echosounder being complementary. The one used in this document is the single-beam echosounder RoxAnn GD-X®.

The report's goal is to give a complete protocol to use RoxAnn GD-X® system, from system installation to data processing. This protocol has been well-tested with almost 40 lakes. The protocol explains how to install material, acquire data for cartography and calibration and then process data. This last point is automatically realized by an R script and gives bathymetric and substrates repartition maps, and a help to optimize default tuning of RoxAnn system. Bottom's nature is predicted by establishing, with calibration data, a relationship between recovered energy (E1 and E2), and depth and substrate class. E1 is the second part of the first echo and reflect roughness and E2, which is energy of second echo, gives information about hardness. When substrates have been predicted for measured points, an interpolation is done to estimate bottom's nature on the complete study zone.

To complete this protocol, two video tutorials have been created and is accessible on the following link:

<https://www.youtube.com/watch?v=YbnXQdL3i8Q&feature=youtu.be>

<https://www.youtube.com/watch?v=VUkdbR0GZ5w&t=4s>

- **KEY WORDS (THEMATIC AND GEOGRAPHICAL AREA)**

Acoustic analysis, single beam echosounder, lakes bottoms, RoxAnn®, lakeside substrates, cartography.

• SYNTHÈSE POUR L'ACTION OPERATIONNELLE

La Directive Cadre Eau (DCE) préconise l'atteinte du bon état des plans d'eau ainsi que leur suivi, ce qui implique une connaissance de la composante de la nature des fonds. En complémentarité des méthodes usuelles (prélèvements à la benne, caméra étanche) qui ne permettent que des mesures ponctuelles se présentent les échosondeurs. Celui utilisé dans ce document est l'échosondeur mono-faisceau RoxAnn GD-X®. Il est livré avec son propre transducteur ainsi qu'un logiciel (RoxMap32 Scientific) permettant de traiter les énergies reçues et d'associer les mesures à une localisation GPS.

Ce document propose une aide à l'installation du système RoxAnn®, matériel et logiciels, un protocole d'acquisition des données ainsi que leur traitement. Le principe de fonctionnement est basé, comme un sonar, sur l'envoi et la réception d'ondes. Les énergies utilisées sont E1, la deuxième partie du premier écho qui informe quant à la rugosité du fond et E2, la totalité du deuxième écho qui renvoie à la dureté du substrat (Ehrhold 2003b). La connaissance de E1 et E2 peut permettre d'identifier le substrat (Orlowski 1986). Le logiciel RoxMap32 Scientific permet d'estimer les substrats en temps réel mais les réglages par défaut ne permettent pas une grande précision (Poulain, Argillier, et Guillard 2010). Ce document propose, pour le traitement des données, une optimisation des réglages par défaut de RoxMap32 ainsi qu'un traitement des données via R *a posteriori* mais offrant une meilleure précision. La Figure 1 présente le schéma du fonctionnement conjoint du système RoxAnn et du traitement de données proposé.

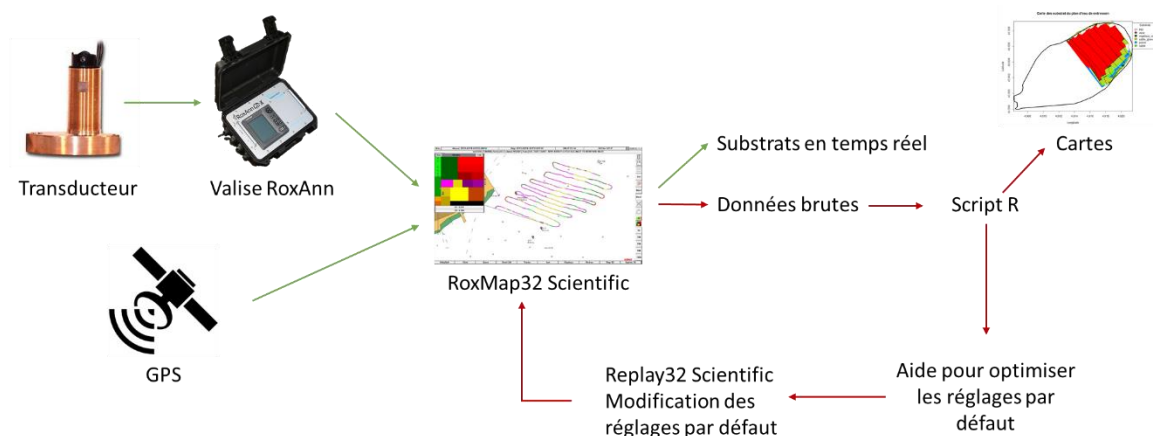


Figure 1 : schéma du fonctionnement global du système RoxAnn et du protocole de traitement des données (flèches en vert : sur le terrain, en rouge : lors du traitement *a posteriori*)

La valise RoxAnn est alimentée par une batterie (type batterie de voiture) et est reliée au transducteur et à l'ordinateur, qui reçoit également les informations du GPS.

Lors de l'installation du matériel, le transducteur doit être mis en place de manière strictement horizontale et à environ 40 cm de profondeur. Avant de démarrer les acquisitions, il est nécessaire d'initialiser le système en lançant le programme RoxAnnGD V1.22 qui indique la marche à suivre. Il est recommandé de choisir la fréquence 200kHz (Poulain et Guillard 2011a). La pré-calibration électrique des instruments est à réaliser sur une surface de fond plane, meuble, type sable fin ou vase située à environ 15m - 25m de profondeur (Ehrhold, 2004b). Cette opération est à répéter avant chaque campagne d'échantillonnage. De par l'imprécision de cette calibration, la comparaison directe de valeurs d'énergies (E1 ; E2) pourrait être entachée d'erreur.

Pour chaque type de substrat rencontré, un enregistrement de données de calibration doit être réalisé. Pour cela, le bateau doit être arrêté et ancré sur une zone de substrat suffisamment large pour éviter tout risque d'erreur. Les enregistrements acoustiques pour la calibration doivent durer 1 à 2

minutes (de 60 à 120 échos). L'identification du substrat se fait par prélèvement à la benne ou par enregistrement vidéo. 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 la robustesse du modèle lors du traitement des données. Les différents types de substrats peuvent être repérés pendant la phase d'acquisition des données, qui peut en effet avoir lieu avant ou après la phase de calibration.

L'acquisition des données se fait à vitesse constante d'environ 7 km.h⁻¹ (soit 3,8 nœuds). Au-delà de cette vitesse, les mesures sont plus espacées. Elles restent cependant valides tant que la vitesse n'excède pas 8 nœuds. En deçà de 3,8 nœuds, il y a recoupement des zones échantillonnées donc une redondance qui n'apporte pas d'information supplémentaire. Le bateau doit être le plus stable possible et la profondeur échantillonnée doit être comprise entre 1,5 et 35 mètres (Poulain et Guillard 2011a). Une profondeur trop faible présente un risque pour le matériel et une saturation du signal. Dans le cas d'une profondeur trop importante, le signal présente des incohérences. La stratégie d'échantillonnage est un compromis à établir entre le temps disponible et la qualité des résultats finaux. La cartographie de zones aux substrats hétérogènes peut nécessiter un effort d'échantillonnage plus important que dans le cas d'un fond homogène. Lors de l'acquisition des données, le logiciel RoxMap32 Scientific affiche en temps réel la trajectoire du bateau, la profondeur et les substrats estimés.

La nature des fond est estimée via le diagramme RoxAnn® qui, à chaque couple (E1 ; E2) associe un substrat. Ce diagramme est donné par défaut et peut être modifié avec le logiciel Replay32 Scientific pour s'adapter au mieux au plan d'eau étudié.

Les données enregistrées peuvent être rejouée par Replay32 Scientific ou exportées au format texte. Le traitement des données proposé est écrit en langage R (R Core Team 2016) et utilise les données brutes au format texte. Dans ce script, seule la première étape requiert l'intervention d'un opérateur afin d'indiquer les fichiers à charger, le nom du plan d'eau etc. En sortie, le script construit une carte de la bathymétrie, une carte de probabilité de présence de chaque substrat rencontré, une carte de répartition des substrats en 2 et 3 dimensions ainsi qu'un soutien pour la modification du diagramme RoxAnn. Un fichier récapitulatif est également édité.

Ce document propose un protocole type afin de cartographier les fonds lacustres mais doit être adapté aux particularités de chaque plan d'eau, aux objectifs de l'étude et aux moyens mis à disposition. Cette méthode est utile pour évaluer et suivre l'état des masses d'eau, conformément aux directives de la DCE. De plus, elle est particulièrement adaptée au milieu lacustre, de par son coût et sa facilité de mise en œuvre.

Pour plus d'informations, consulter le rapport complet : Utilisation du système RoxAnn pour la classification des fonds lacustres, Mouget et al., 2017 ou contacter les auteurs :

Anne MOUGET, ingénieur d'études (INRA), anne.mouget@inra.fr

Christine ARGILLIER, directrice de recherche (IRSTEA), christine.argillier@irstea.fr

Julien DUBLON, ingénieur d'études (IRSTEA), julien.dublon@irstea.fr

François GUITON, ingénieur d'études

Thomas Poulain, ingénieur d'études, thomas.poulain1984@gmail.com

Philippe Ruiz, ingénieur d'études

Jean Guillard, ingénieur de recherche (INRA), jean.guillard@inra.fr

- **SOMMAIRE**

1. Introduction	9
2. Présentation et mise en place des différents éléments du système RoxAnn10	10
2.1. Présentation du matériel	10
2.1.1. L'échosondeur et le transducteur.....	10
2.1.2. Le boîtier de traitement du signal.....	11
2.1.3. Le GPS	11
2.2. Présentation des logiciels	11
2.2.1. Le logiciel d'acquisition des données RoxMap32 Scientifc	12
2.2.2. Le logiciel Replay32 Scientifc.....	12
2.2.3. Les autres logiciels	13
2.2.4. Installation des logiciels	13
3. Manipulations préalables à l'acquisition des données.....	14
3.1. Créer un dossier de stockage des données.....	14
3.2. Mise en place et préparation du matériel	15
3.2.1. Branchements.....	15
3.2.2. Installation du matériel	15
3.3. Initialisation du système.....	16
3.4. Réglages de l'échosondeur.....	17
3.4.1. Sélection d'une fréquence	18
3.4.2. Sélection d'une profondeur maximale et d'un gain	18
3.5. Manipulation du logiciel RoxMap32 Scientifc	18
4. Protocole d'acquisition des données.....	21
4.1. Recommandations générales.....	21
4.2. Protocole d'acquisition des données de calibration	21
4.3. Protocole d'acquisition des données	22
4.4. Quelques clefs pour la mise en place d'une stratégie d'échantillonnage....	22
5. Traitement des données	26
5.1. Exportation et mise en forme des données enregistrées	26
5.1.1. Exportation des données RoxAnn au format texte.....	26
5.1.2. Formatage des données pour le script R	26
5.2. Méthodes proposées pour le traitement des données	27
5.3. Utilisation du script R	27
5.4. Sorties du script R	28
5.4.1. La carte de bathymétrie	28
5.4.2. La matrice des substrats prédits	29
5.4.3. Les cartes de probabilité de présence par substrat	29
5.4.4. La carte de répartition des substrats.....	30
5.4.5. Carte 3D de répartition des substrats	31
5.4.6. Graphique 3D de représentation des substrats.....	31
5.4.7. Les sorties utiles à l'édition des carrés RoxAnn.....	31
5.4.8. Fichier récapitulatif.....	32
5.5. Edition des carrés RoxAnn®	32
6. Conclusion.....	35
7. Glossaire.....	36

8. Sigles & Abréviations	37
9. Bibliographie	38
10. Table des illustrations	40
11. Annexe 1 : Fiche synthèse du protocole terrain.....	41
12. Annexe 2 : Fiche terrain.....	42
13. Annexe 3 : Réglages faciles du script R	43
14. Annexe 4 : Résolution de quelques problèmes possibles lors de l'exécution du script R	45
15. Annexe 5 : Description du script R.....	47
16. Annexe 6 : Choix des modèles utilisés lors de la construction des cartes .	49
17. Remerciements	50

- **UTILISATION DU SYSTEME ROXANN® POUR LA CLASSIFICATION DES FONDS LACUSTRES**

1. Introduction

La Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE), adoptée au Parlement Européen en 2000 (European Commission 2000), définit un nouveau contexte en matière de politique de l'eau reposant sur une gestion globale et intégrée des milieux aquatiques. Elle fixe des objectifs ambitieux pour la préservation et la restauration de l'état des eaux superficielles et souterraines.

Les caractéristiques physico-chimiques de l'eau, l'hydrologie et la morphologie sont considérées comme les facteurs de contrôle de la biodiversité aquatique (Gob et al. 2014). Les substrats qui tapissent les fonds sont en effet corrélés aux habitats potentiels de la zone (Cholwek et al. 2000; Murphy, Leary, et Williamson 1996; Orr et al. 2008; Pinn et Robertson 1998; Sotheran, Foster-Smith, et Davies 1997). La connaissance de la nature des fonds permet une meilleure compréhension de l'écosystème et de son état, ce qui constitue la première étape de la DCE et est nécessaire pour la mise en place de plans de gestion et de restauration ainsi que dans le cadre de programmes de surveillance de l'évolution des systèmes.

La nature des fonds peut être appréhendée de différentes manières. Deux des méthodes les plus utilisées sont le prélèvement *in situ*, qui s'effectue généralement à l'aide d'une benne, et l'observation directe, à l'œil nu ou via une caméra étanche. Le prélèvement permet de connaître parfaitement la granulométrie et de réaliser des analyses physico-chimiques. Cependant, cette méthode n'est pas applicable dans le cas d'un substrat trop dur, a une mise en œuvre assez lourde et un taux de réussite variable. L'observation a également des inconvénients avec une analyse moins complète et qui peut être perturbée par la visibilité (Ehrhold 2003a). De plus, ces méthodes ne permettent que des mesures ponctuelles et ne sont donc pas adaptées à la description d'un plan d'eau complet. Depuis le début des années 1980, des méthodes alternatives ont été mises en place afin d'obtenir des informations sur la nature des fonds marins à partir d'échosondeurs (Orlowski 1986). Ces méthodes, complémentaires aux premières, permettent une description sur une grande échelle spatiale.

Aujourd'hui, l'analyse des signaux issus de différentes technologies telles que le sonar à balayage latéral ou le sondeur multifaisceaux permettent de déterminer avec précision la nature des fonds marins (Poulain, Argillier, et Guillard 2010). Cependant, l'utilisation d'un échosondeur mono-faisceau reste plus approprié aux milieux lacustres de par sa mise en œuvre (il peut être installé sur une petite embarcation), son coût (compatible avec les budgets alloués au suivi des écosystèmes lacustres), et ce d'autant plus qu'il existe des sondeurs dédiés à cette approche. Ce document présente la mise en œuvre d'un système commercialisé (RoxAnn-GDX®) qui permet de déterminer la nature des fonds lacustres et qui utilise un échosondeur mono-faisceau.

L'utilisation et l'exploitation des données issues du système de classification automatique des fonds RoxAnn-GDX® distribué par Sonavision ont fait l'objet de plusieurs rapports visant à informer sur l'utilisation de ce système dans les milieux lacustres ainsi que sur les méthodes d'interprétation des données fournies (Guiton et Ruiz 2013; Poulain et al. 2010; Poulain, Argillier, et Guillard 2010; Poulain et al. 2011; Poulain et Guillard 2011a, 2011b; Poulain, Guillard, et Argillier 2011).

Ce document a pour objectif de définir un **protocole complet** de l'utilisation du système, de l'installation du matériel à la création de cartes de répartition des substrats. Il présente le matériel, les logiciels d'utilisation et la méthode d'exploitation des données. Il reprend donc une partie des rapports de Thomas Poulain, Jean Guillard (Poulain et Guillard 2011b), Philippe Ruiz, Julien Dublon (Ruiz et al. 2013) et François Guiton (Guiton et Ruiz 2013).

2. Présentation et mise en place des différents éléments du système RoxAnn

2.1. Présentation du matériel

Le système RoxAnn GD-X® (sonavision.co.uk) est un appareil de caractérisation des fonds subaquatiques vendu avec son échosondeur, son transducteur ainsi que son logiciel d'acquisition et d'analyse (Figure 2).

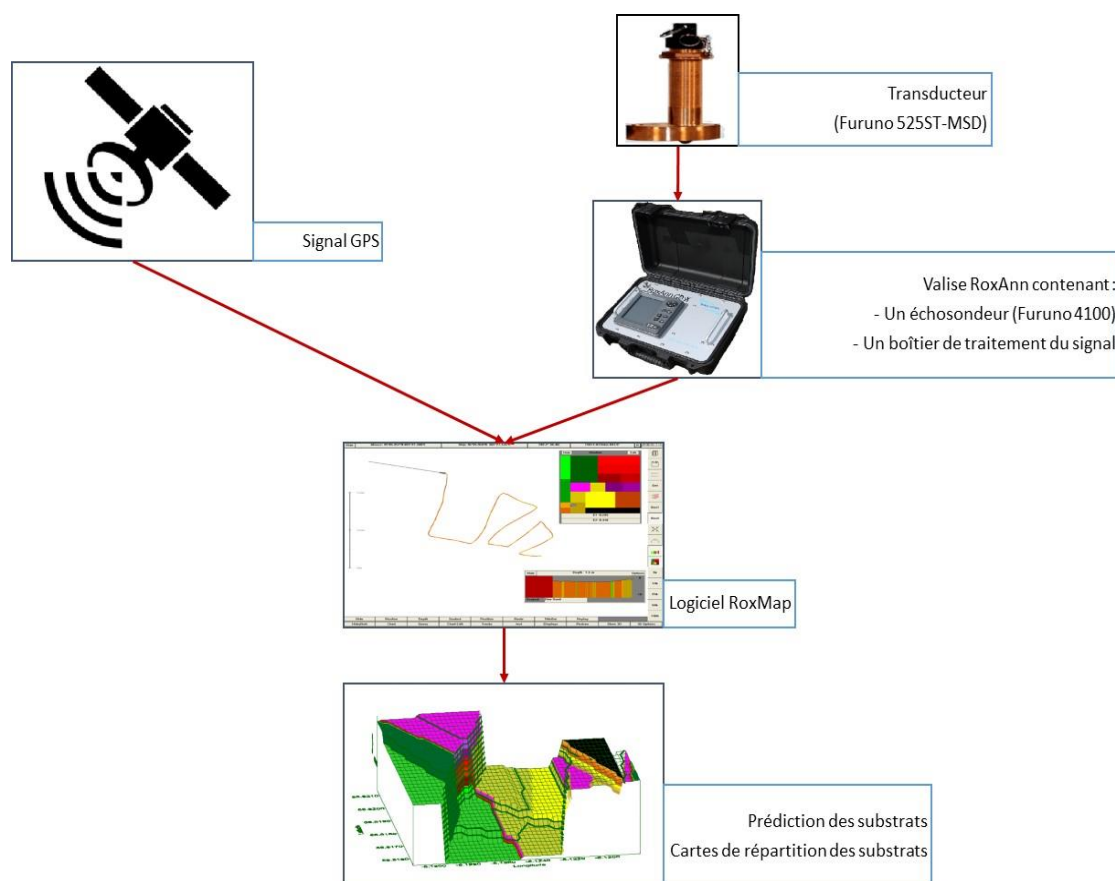


Figure 2 : Le système RoxAnn GD-X® et ses différents composants (d'après Sonavision 2006)

2.1.1. L'échosondeur et le transducteur

L'échosondeur testé dans ce document, fourni avec RoxAnn GD-X® et intégré dans une valise, est le modèle LS-4100 de la marque Furuno pouvant délivrer des ondes acoustiques de deux fréquences : 50 et 200 kHz. La puissance de sortie est fixe (300 Watts), la récurrence d'émission des impulsions peut atteindre 500 impulsions par minute et la longueur d'impulsion varie entre 0,1 et 0,8 ms. Ces deux paramètres sont ajustés automatiquement par l'appareil en fonction de la profondeur (Chevillon 2001; Furuno 2017a). L'échosondeur doit être alimenté par un générateur de tension continue (de 10 à 36 V), type batterie de voiture.

Le transducteur fourni (Furuno 525ST-MSD) a un angle d'ouverture de 10° pour la fréquence de 200 kHz (Furuno 2017b)

2.1.2. Le boîtier de traitement du signal

Le boîtier de traitement du signal électronique permet de calculer les deux valeurs d'énergie E1 et E2 telles que définies par Orłowski (1986), à partir des signaux acoustiques bruts. E1 correspond à l'énergie de la seconde partie du premier écho et E2 est l'énergie totale du second écho (Figure 3). E1 est une traduction de la rugosité du fond, alors que E2 caractérise sa dureté (Ehrhold 2003b). En effet, l'énergie de la seconde partie du 1er écho permet de quantifier l'énergie diffusée par la surface insonorisée et le calcul de l'énergie totale du second écho permet de définir l'énergie perdue lors des deux réflexions sur le fond, ce qui traduit sa dureté.

Le boîtier peut théoriquement émettre et recevoir des ondes acoustiques sur des fréquences de 50 et 200 kHz. Lors d'acquisitions sur des plans d'eau profonds, une incohérence du signal a été détectée lorsque la bathymétrie dépassait 35 à 40 m, ceci pour les deux fréquences (Poulain et Guillard 2011a). Il n'est pas non plus conseillé d'effectuer des mesures dans des zones de moins de 1,50 m de profondeur sous le transducteur. Cela entraîne des risques pour le matériel et une possible perte de signal ou une saturation (Chevillon 2001). Dans ces conditions limites, les résultats obtenus ne peuvent être garantis.

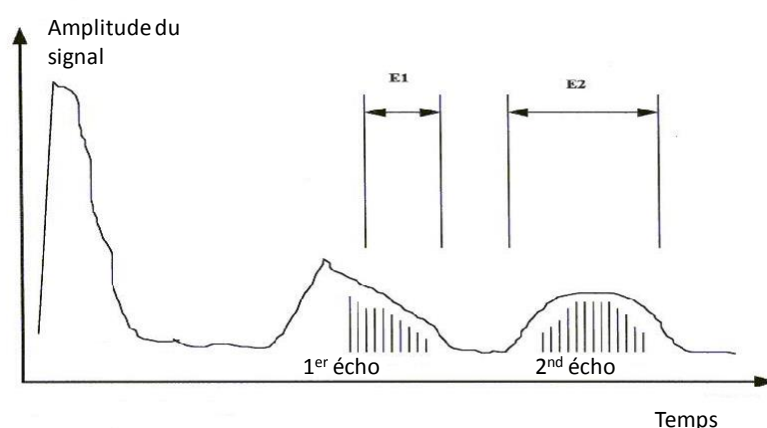


Figure 3 : Traitement du signal pour calculer E1 et E2 (d'après Chevillon 2001)

2.1.3. Le GPS

Il est nécessaire d'avoir un récepteur GPS relié directement à l'ordinateur via le port USB et détecté par l'ordinateur et le système RoxAnn®. Le GPS utilisé lors des tests est le périphérique USB *RoHS SiRFstarIII*. Il est important de noter que ce GPS a une précision de l'ordre de 5 à 10 mètres, mais que dans certains cas, l'information peut être plus dégradée et la précision est alors moindre.

2.2. Présentation des logiciels

Le système RoxAnn® comporte plusieurs logiciels qui permettent d'en assurer le bon fonctionnement. Parmi les principaux se trouvent le programme RoxAnnGD V1.22, qui permet l'initialisation du système ainsi que la sélection de fréquences, ainsi que RoxMap32 Scientific et Replay32 Scientific qui permettent de traiter les données.

Les logiciels RoxMap32 et Replay32 permettent, à l'aide des données récoltées, de prédire le substrat à un endroit donné. Les couples (E1 ; E2) sont traduits à l'aide d'un diagramme qui, pour chaque couple d'énergie renvoie un substrat. Ce substrat est ensuite localisé grâce aux données issues du GPS. Chaque substrat forme, dans le diagramme, un « carré RoxAnn® » (Figure 4). Paramétré par défaut, il est cependant possible de l'affiner en utilisant les données de calibration (Figure 1).

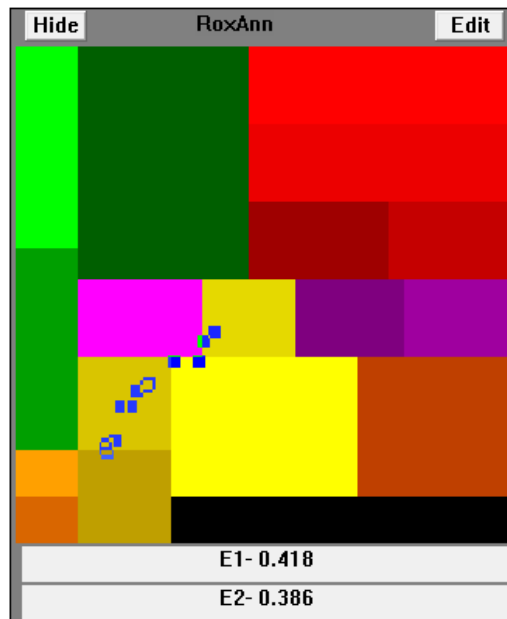


Figure 4 : Diagramme RoxAnn® (paramétré par défaut) avec quelques points de mesure

2.2.1. Le logiciel d'acquisition des données RoxMap32 Scientific

Le logiciel RoxMap32 Scientific permet d'enregistrer les données fournies par le boîtier de traitement du signal. Grâce au GPS connecté à l'ordinateur, la position géographique du point échantillonné est associée aux valeurs d'énergie des premier et second échos E1 et E2. En temps réel, le parcours est tracé et un code couleur permet de distinguer les différentes natures de substrats rencontrés. Chaque couple (E1 ; E2) est associé à un substrat, soit avec des paramètres par défaut, soit avec des paramètres manuellement définis. Une option permet également d'afficher le profil bathymétrique.

2.2.2. Le logiciel Replay32 Scientific

Ce logiciel permet de rejouer *a posteriori* les données acquises sur le terrain. L'intérêt principal étant de pouvoir **redéfinir les limites du diagramme RoxAnn®, c'est à dire d'avoir un calibrage propre au plan d'eau étudié** en attribuant une nature de substrat à un couple (E1 ; E2) et donc d'avoir une estimation du substrat en temps réel. L'interface de Replay32 Scientific est similaire à celle de RoxMap32 Scientific.

2.2.3. Les autres logiciels

Le logiciel RoxAnn GD V1.22 permet l'initialisation du système nécessaire avant le lancement des enregistrements. Ce logiciel est simple d'utilisation car il donne les consignes au fur et à mesure de l'avancement de l'initialisation.

Les données sont enregistrées par le boîtier RoxAnn® dans un format propriétaire crypté. Le programme "dbcscit.exe" (C:\ROX2TEXT) permet de rendre les données enregistrées dans ROXMAP\Database lisibles en format texte.

Le programme "Multidb.exe" (C:\ROXMAP) permet de gérer les dossiers d'enregistrement des données par le programme RoxMap32 en offrant la possibilité de les renommer et de les organiser différemment. Ce dernier ne fonctionne pas sous Windows 64-bits. L'utilisation de ces deux programmes ne présente pas de difficulté particulière. Il s'agit d'exécutables lisant automatiquement les données en format propriétaire lorsque celles-ci sont situées dans le répertoire par défaut (C:\ROXMAP\Database).

2.2.4. Installation des logiciels

- Ancienne version

L'installation de l'ancienne version se fait via le disque « RoxMap Scientific Installation CD » en lançant l'exécutable « SETUP ». Ceci permet d'installer tous les logiciels décrits précédemment. Sur ce même disque il faut également lancer le programme « HASPUserSetup » situé dans le répertoire « security », qui permet d'installer le pilote du dongle. Ce dongle est une clef USB qui autorise l'utilisation des programmes car ceux-ci sont protégés.

- Nouvelle version

Sonavision a mis à jour les pilotes matériels pour fonctionner sous Windows 7 et postérieur. L'ensemble des fichiers nécessaires sont : "5249-22-0012_roxann_gd_mk1_app", "5249-22-0014_roxmap_sci_app", "CP210x_VCP_Win_XP_S2K3_Vista_7". Ils sont téléchargeables depuis : <http://www.sonavision.co.uk/>

3. Manipulations préalables à l'acquisition des données

3.1. Créer un dossier de stockage des données

L'utilisation de RoxMap est nécessaire pour effectuer des acquisitions, mais sa façon de gérer les données enregistrées n'est pas intuitive. Toutes les données sont enregistrées dans le répertoire Database situé à l'emplacement suivant : C:\ROXMAP. Les jeux de données sont enregistrés avec les noms *trackx*, avec *x* correspondant au numéro de la série de données enregistrée. C'est à dire qu'à chaque fois que l'on commence un enregistrement, un fichier *trackx+1* est créé et toutes les données de cette nouvelle série sont enregistrées dans ce fichier. Il est donc difficile de s'y retrouver après avoir échantillonné un certain nombre de plans d'eau et effectué plusieurs enregistrements sur chacun d'entre eux. Le programme Multidb.exe (C:\ROXMAP\Multidb.exe) permet de modifier ces enregistrements par défaut et donc d'enregistrer les données dans d'autres répertoires préalablement créés. Voici le détail de la procédure à suivre :

- 1- Aller dans le répertoire C:\ROXMAP
- 2- Créer un nouveau répertoire et lui donner un nom (le nom du plan d'eau qui va être échantillonné par exemple). Attention, le nom ne doit pas excéder 8 caractères.
- 3- Ouvrir le répertoire Database et copier le fichier texte « multidb.txt »
- 4- Coller ce fichier dans le répertoire créé à l'étape 2-, l'ouvrir puis le transformer de la façon suivante :

[Names]

Directory = nom du nouveau répertoire créé à l'étape 2-

Name = nom du nouveau répertoire créé à l'étape 2-

Enregistrer puis fermer ce fichier texte qui va permettre au programme « Multidb.exe » de reconnaître le nouveau répertoire comme un répertoire de stockage des données RoxAnn.

- 5- lancer Multidb.exe et sélectionner le répertoire créé.

Le logiciel RoxMap32 Scientific peut ensuite être lancé.

Attention : Note système 64 bits.

Multidb.exe ne fonctionne pas sous Windows 64 bits.

Dans le cas où plusieurs lacs sont échantillonnés. Le plus simple est de ne pas modifier les dossiers d'enregistrement par défaut (database). Une fois les enregistrements terminés convertir les données avec dbcsct.exe et déplacer tous les fichiers dans un nouveau dossier.

3.2. Mise en place et préparation du matériel

3.2.1. Branchements

Le modèle GD-X est une version fonctionnelle du système RoxAnn®. Tout est orienté autour d'une valise qui simplifie les branchements entre les différents appareils. Les branchements doivent être effectués avant la mise sous tension et dans l'ordre préconisé par le constructeur (Figure 5).

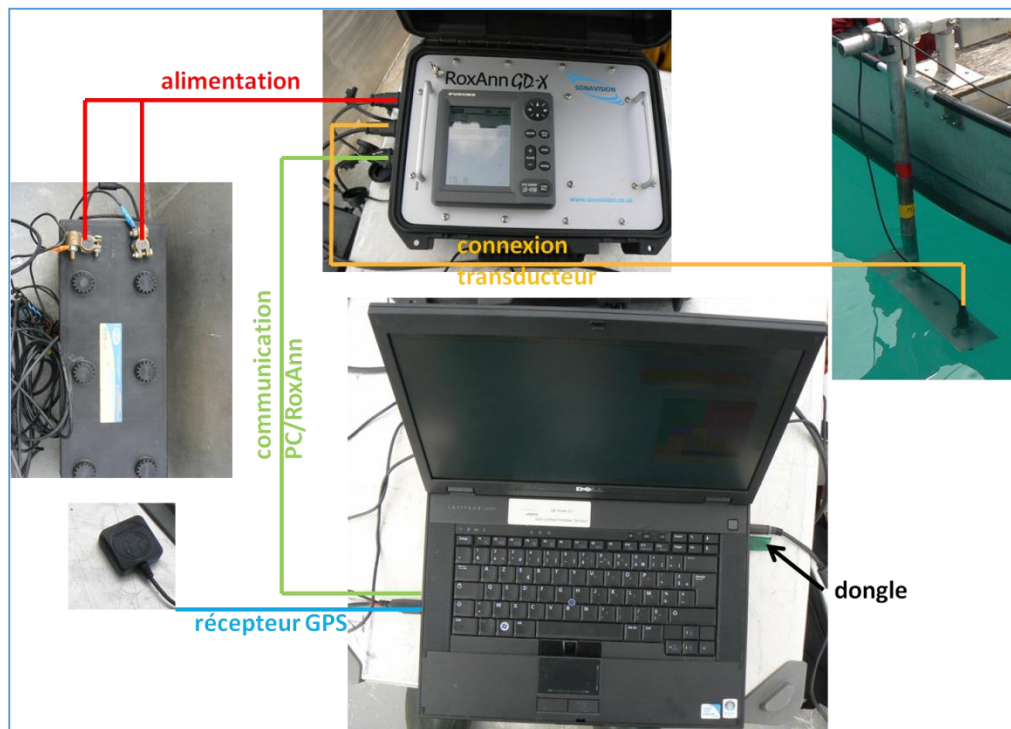


Figure 5 : Montage du système RoxAnn (source : Ruiz et al. 2013)

3.2.2. Installation du matériel

Lors de l'installation du transducteur, il faut veiller à ce qu'il soit immergé assez profondément pour qu'il ne ressorte pas de l'eau lors du roulis ou tangage du bateau, et ceci de manière horizontale stricte, et relié à la valise. A la vitesse normale d'utilisation (3,8 nœuds) la barre de fixation du transducteur crée une dépression à l'arrière sur une vingtaine de centimètres depuis la surface. Cette dépression est responsable de fortes turbulences qui influent sur la qualité du signal enregistré et qui peuvent être responsables d'enregistrements incohérents. Il est donc nécessaire d'enfoncer suffisamment la sonde dans l'eau, c'est-à-dire une profondeur d'environ 40 cm sous la surface. Il est nécessaire de s'assurer que l'horizontalité du transducteur est bien respectée lors des trajets. Le montage proposé (Figure 6)

est formé d'un tube vertical suffisamment solide, relié au bateau de manière à garantir sa verticalité. Le transducteur est relié au tube au moyen de colliers de serrages.



Figure 6 : Montage assurant l'horizontalité du transducteur

L'alimentation de l'échosondeur se fait par une source de tension directe comprise entre 10 et 36 V en utilisant par exemple une batterie voiture 12V. Ont été testées la batterie FIAMM FGV 21705, 12 Volts et 17 Ah (testée durant plusieurs heures) et la batterie YUASA NP7-12 12 Volts et 7 Ah (plus légère et également testée pendant plusieurs heures). Dans le cas d'utilisation de batteries de moindre puissance, la fiabilité des résultats ne saurait être garantie.

3.3. Initialisation du système

Avant de commencer les acquisitions il est nécessaire d'initialiser le système. La procédure est la suivante et ne peut être lancée que si le transducteur est complètement immergé. Un transducteur qui serait initialisé dans l'air peut être détérioré.

1- Ordinateur éteint, échosondeur éteint. Faire tous les branchements (échosondeur, GPS, transducteur, batterie, dongle et ordinateur (Figure 5).

2- Allumer l'ordinateur

4- Dans le Menu Démarrer, sélectionner RoxAnnGD V1.22 puis Installation : il s'agit de l'interface permettant de synchroniser les différents appareils.

5- Laisser la langue anglaise par défaut

6- Attendre que le GPS et l'échosondeur soient détectés. C'est le cas lorsque les numéros des ports du GPS et du sondeur sont détectés (affichage de numéros à la place de « Wait... »).

Si l'ordinateur ne reconnaît pas le GPS et l'échosondeur, effectuer la manipulation suivante :

Dans le gestionnaire de périphériques (dans le panneau de configuration, sélectionner matériel et audio puis gestionnaire de périphérique), sélectionner « ports ».

Le GPS s'affiche comme « Prolific USB-to-Serial Comm Port » et doit être considéré comme le COM1 par l'ordinateur.

RoxAnn s'affiche comme « Silicon Labs CP210x USB to UART Bridge » et doit être considéré comme le COM2.

Si le COM n'a pas le bon numéro, il est possible de le modifier dans en sélectionnant « paramètre du port » puis « avancé ». Il peut être nécessaire alors de réinitialiser l'ensemble de la chaîne.

Une fois les COM correctement définis, il est conseillé de ne plus modifier les branchements et donc de les garder d'une fois à l'autre : de cette façon, cette opération ne sera pas à refaire.

7- Choix de la fréquence : Sélectionner le « channel » correspondant à la fréquence choisie

D'après Poulain et Guillard (2011a), il est préférable d'utiliser la fréquence de 200 kHz qui permet d'obtenir une résolution plus fine dans la distinction des classes granulométriques.

8- Passer à la fenêtre suivante : calibration.

La mise sous tension de l'échosondeur est à réaliser à partir de cette étape. Avant de lancer la phase de calibration, il est nécessaire de s'assurer que l'échosondeur est allumé et correctement réglé.

La case « Harbour Test » permet de faire un test dans très peu d'eau afin de s'assurer du bon fonctionnement des instruments avant de partir.

La case « Calibration at Sea » est une phase de pré-calibration électronique de l'appareil et doit être réalisée dans une zone de surface plane, meuble, type sable fin ou vase (fond étalon) située à environ 15m - 25m de profondeur (Ehrhold, 2004b). Ce n'est qu'à ce moment que l'échosondeur peut être allumé et réglé.

Pour finaliser la pré-calibration électrique (une fois l'échosondeur allumé et correctement réglé), suivre les instructions à l'écran. L'appareil va effectuer une acquisition de données de plusieurs secondes. Cette phase est indispensable avant de commencer l'enregistrement de données et n'est à effectuer qu'une seule fois par campagne d'échantillonnage. De par l'imprécision de cette étape, la comparaison directe de valeurs d'énergie (E1 ; E2) enregistrées avec des pré-calibrations différentes pourrait être entachée d'erreur.

Lorsque cette opération est terminée le système propose à l'opérateur de finir la phase de calibration (bouton Finish).

3.4. Réglages de l'échosondeur

Pour mettre l'échosondeur sous tension, appuyer sur le bouton « POWER » (**1** , Figure 7).

La fréquence, la profondeur maximale et le gain sont les seuls paramètres à régler sur l'échosondeur (Figure 7).



Figure 7 : Echosondeur Furuno LS4100 et ses réglages

3.4.1. Sélection d'une fréquence

Si, en théorie, l'échosondeur qui équipe le modèle GD-X est capable de délivrer deux fréquences (50 et 200 kHz), en opérationnel, il faut toujours ne sélectionner qu'une des deux fréquences. En effet, le boîtier de traitement du signal ne permet pas d'utiliser la fonction « dual frequency » du sondeur.

MODE (2 , Figure 7) → SINGLE FREQ. → 50 kHz ou 200 kHz (même fréquence que celle définie sur l'ordinateur)

Il est préférable d'utiliser la fréquence de 200 kHz qui permet d'obtenir une résolution plus fine dans la distinction des classes granulométriques (Poulain et Guillard 2011a).

3.4.2. Sélection d'une profondeur maximale et d'un gain

L'échosondeur permet de sélectionner une profondeur maximale visible sur l'écran de contrôle. Cette sélection va agir sur la récurrence d'émission des impulsions. En effet, connaissant la vitesse d'une onde sonore dans l'eau douce ($\approx 1435 \text{ m.s}^{-1}$), le sondeur ajuste l'intervalle entre deux impulsions, en fonction du temps que met l'onde pour parcourir l'aller-retour entre le transducteur et la profondeur maximale choisie. Puisque le système RoxAnn a besoin des deux premiers échos, il faut choisir une profondeur de visualisation deux fois supérieure à la profondeur maximale réelle du plan d'eau qui sera échantillonnée. La profondeur maximale à laquelle le système RoxAnn GD-X® reste opérationnel est d'environ 35-40 m (Poulain and Guillard, 2011a). Cette profondeur maximale est directement liée à la puissance de l'échosondeur. Il est donc conseillé de régler la profondeur maximale à 80 m ou moins si la profondeur du lac est inférieure à 40 m. Ce réglage s'effectue directement sur le panneau de contrôle du sondeur avec le bouton (3 Figure 7)

Le gain est un paramètre qui joue sensiblement sur les données enregistrées par le système. C'est donc un paramètre qu'il ne faut pas modifier pendant toute la phase d'acquisition. À la suite de tests effectués sur ce paramètre, il s'avère que le système semble avoir un optimum d'utilisation pour une valeur de 50 % : réglage sur l'échosondeur 5 (4 Figure 7). C'est une valeur à laquelle le système semble le plus performant pour discriminer les variations d'énergie (Ruiz et al. 2013). Il faut donc vérifier que le gain est correct avant de commencer les acquisitions.

3.5. Manipulation du logiciel RoxMap32 Scientific

Une fois l'initialisation terminée, il est possible de lancer RoxMap32 Scientific. Ce logiciel est l'interface qui permet de visualiser les paramètres calculés par le boîtier RoxAnn® et donc de visualiser la bathymétrie et la nature du fond au fur et à mesure. Toutes les fonctions sont détaillées dans le manuel d'utilisation mais sont répertoriées ici les opérations de bases à effectuer pour enregistrer des séquences. Une fois le logiciel lancé, un écran apparaît (Figure 8).

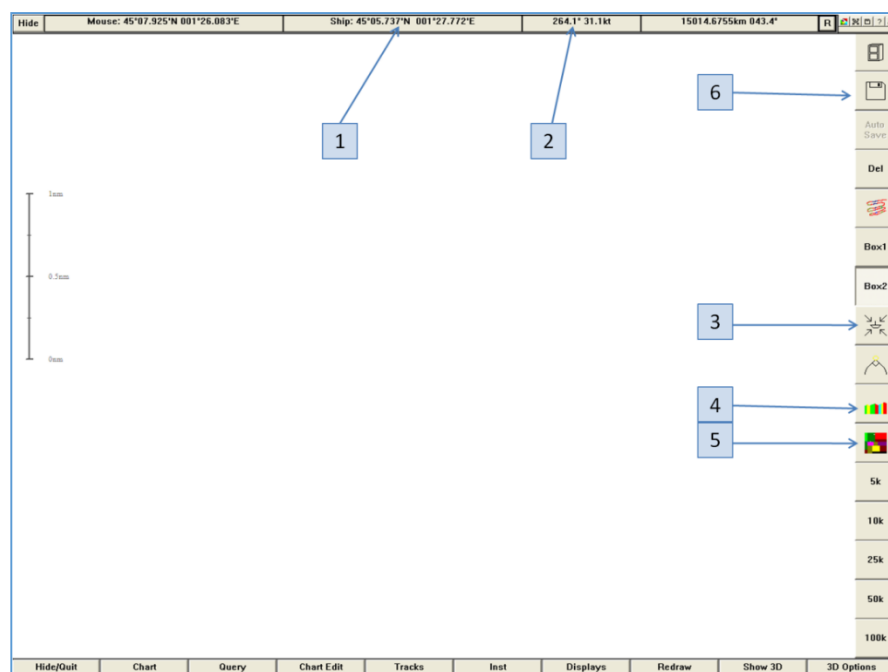


Figure 8 : Fenêtre vierge de RoxMap32 Scientific

Pour s'assurer que le GPS fonctionne correctement, les coordonnées de la position actuelle du bateau doivent s'afficher en **1** (Figure 8). La vitesse instantanée du bateau s'affiche en **2** et ne doit pas dépasser 8 nœuds car au-dessus la validité des résultats n'est plus assurée (Hamilton, Mulhearn, et Poeckert 1999).

Le bouton **3** permet de centrer la trace du bateau (Figure 9) sur la position actuelle. En cliquant sur **4** et **5**, deux fenêtres apparaissent, qui sont respectivement le profil bathymétrique et la représentation du couple (E1, E2) sur le carré RoxAnn® (Figure 9).

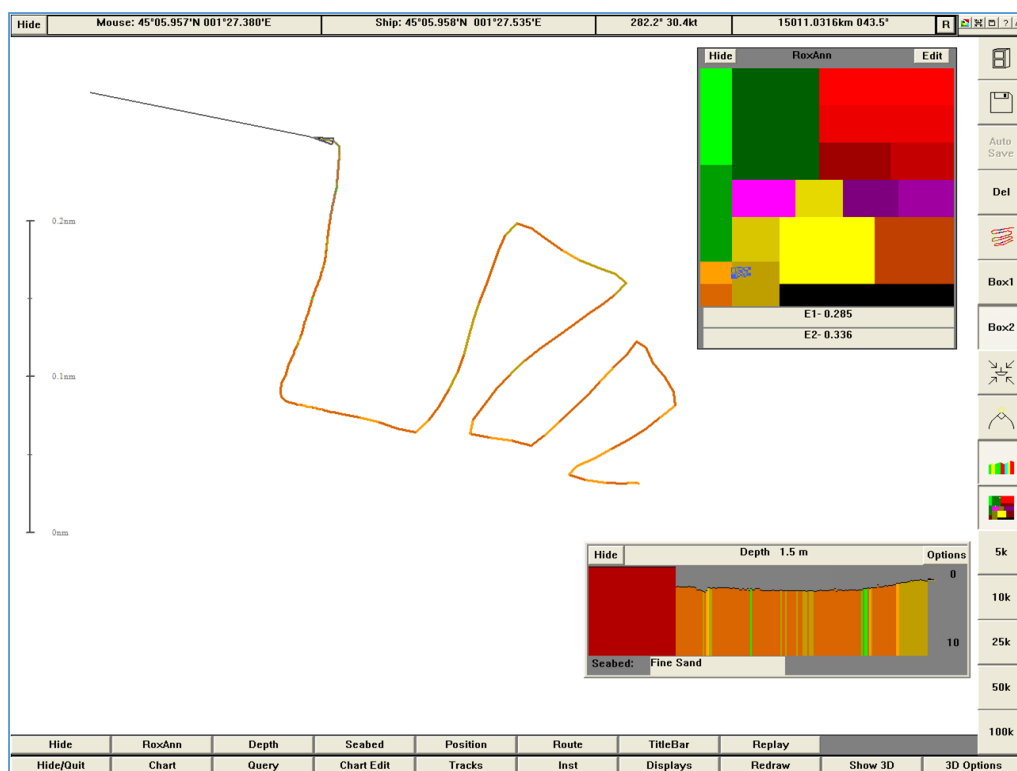


Figure 9 : Ecran de RoxMap32 avec profil bathymétrique et carrés RoxAnn activés

La nature du substrat sondé, déterminée à partir de la base de données par défaut fourni par le constructeur, s'affiche en temps réel sous le profil bathymétrique.

Pour commencer à enregistrer les acquisitions, il faut cliquer sur l'icône « disquette » ⁶ (Figure 8), puis recliquer dessus pour terminer l'enregistrement. A chaque nouvel enregistrement, un fichier nommé trackx+1 est créé dans le répertoire sélectionné avec le programme Multidb.exe.

4. Protocole d'acquisition des données

4.1. Recommandations générales

Ce protocole s'inspire des travaux d'Alex Ehrhold, Ifremer (Ehrhold 2003a, 2003b, 2004) réalisés dans le cadre du projet Rebut (Réseau de surveillance benthique région Bretagne), du « Protocole d'échantillonnage et descripteurs morphométriques » (Alleaume, Lanoiselee, et Argillier 2010) et d'un certain nombre de rapports déjà réalisés avec ce même système (Poulain, Argillier, et Guillard 2010; Poulain et Guillard 2011b; Ruiz et al. 2013)

Ce protocole présente deux phases distinctes dont l'ordre d'exécution n'a pas d'impact sur les résultats finaux. La première phase consiste à acquérir les données de calibration. La seconde à acquérir les mesures pour la cartographie. La phase de calibration est utilisée pour le traitement des données, postérieur aux mesures et ne nécessite donc pas d'être réalisée avant l'acquisition des données. Une fiche synthèse du protocole a été éditée en Annexe 1 : Fiche synthèse du protocole **terrain**. Ce n'est pas un résumé mais seulement quelques rappels du protocole.

4.2. Protocole d'acquisition des données de calibration

Cette phase peut avoir lieu avant ou après l'acquisition des données. L'objectif est d'avoir suffisamment d'enregistrements acoustiques par type de substrat pour construire un jeu de calibration robuste. La calibration est propre à chaque lac et chaque campagne d'échantillonnage.

Afin de minimiser l'erreur de distance entre la zone de prélèvement ou d'acquisition vidéo et les enregistrements acoustiques il est conseillé de réaliser les deux étapes suivantes en même temps. Pour limiter les perturbations possibles dues à la caméra sur les ondes acoustiques, il vaut mieux faire les observations à l'opposé du bateau par rapport à la sonde.

Le choix des zones d'intérêt pouvant servir à la calibration peut se faire soit à partir de données déjà acquises ou de connaissances d'acteurs locaux, ou alors à l'aide de la carte fournie en direct par RoxMap32 Scientific et donc suite à l'acquisition des données de cartographie. C'est la façon la plus rapide sur une petite embarcation de repérer les zones de substrats différents lors des acquisitions. Il faut alors bien noter sur un support ces localisations, et ensuite il suffit de se rendre sur chaque zone que l'on souhaite observer pour réaliser des enregistrements de la manière suivante :

- Vérifier que l'on est sur une zone de substrat suffisamment large pour limiter les erreurs d'identification du substrat, en utilisant par exemple le système RoxAnn sur la zone choisie.
- Ancrer le bateau pour éviter qu'il dérive.
- Eteindre le moteur pour limiter les perturbations acoustiques.
- Commencer les enregistrements acoustiques : ≈ 1 à 2 minutes (60 x 2 min = 120 échos).
- Procéder à l'enregistrement vidéo ou à l'échantillonnage à la benne.
- Arrêter les enregistrements au bout d'une à deux minutes.
- Dans le cas des prélèvements à la benne faire une photo du prélèvement avec une échelle granulométrique ou conserver l'échantillon pour une détermination au laboratoire.
- Remplir la fiche terrain (Annexe 2 : Fiche terrain).

Avec cette méthode, la position GPS des enregistrements servant à la calibration est fournie par le système RoxAnn. Il est donc important de noter dans la fiche terrain un paramètre permettant de faire la correspondance entre les enregistrements de l'échosondeur, les enregistrements vidéo et les échantillons à la benne. En général l'heure système de l'ordinateur est une donnée assez fiable. La position GPS peut également être notée pour retrouver plus facilement les données.

Au minimum il est nécessaire de faire un enregistrement par type de substrat rencontré lors de la phase de cartographie. Cependant pour améliorer la fiabilité des données et augmenter le nombre de valeurs disponible pour la phase de calibration il est souhaitable de réaliser deux enregistrements par catégories de substrats rencontrées et ceci, dans des conditions différentes (préférentiellement à deux profondeurs différentes). Ceci permet d'augmenter la fiabilité des données de calibration sans augmenter fortement la durée de la manipulation (2 à 3 minutes supplémentaires par type de substrat).

Les substrats rencontrés sont à identifier à partir d'un prélèvement par benne (Agence de l'eau Loire-Bretagne 2006) ou via enregistrement vidéo puis classifiés parmi 7 catégories homogènes. Un substrat est considéré comme homogène s'il représente plus de 70% du poids total du prélèvement

(Guiton et Ruiz 2013). Les substrats collectés à la benne sont classés d'après les travaux de Pourriot et Meybeck (1995) (Tableau 1).

Tableau 1 : Correspondances entre granulométrie et dénomination

Substrat	Nomenclature	Caractéristiques
Végétaux	vegetaux	Substrat recouvert de végétaux
Vase ou limon	vase	$\varnothing < 20 \mu\text{m}$
Sable	sable	$20 \mu\text{m} < \varnothing < 2 \text{ mm}$
Gravier	gravier	$2 \text{ mm} < \varnothing < 20 \text{ mm}$
Pierre	pierre	$20 \text{ mm} < \varnothing < 200 \text{ mm}$, forme plate avec bords tranchants
Galet	galet	$20 \text{ mm} < \varnothing < 200 \text{ mm}$, forme arrondie
Bloc	bloc	$\varnothing > 200 \text{ mm}$
Indéterminé	IND	Substrat non déterminé ou absent de la liste

Lorsque deux substrats sont présents dans l'échantillon avec un poids minimal de 30% chacun, l'échantillon est considéré comme mixte (Guiton et Ruiz 2013) et noté *substrat1_substrat2*. Si aucun substrat n'atteint 30%, l'échantillon est classé comme indéterminé.

4.3. Protocole d'acquisition des données

Pour que les enregistrements soient les plus fiables possible, quelques règles sont à respecter. Il ne faut pas hésiter à arrêter l'enregistrement lorsque ces conditions ne sont pas respectées.

- Garder une vitesse la plus constante possible à environ **7 km.h⁻¹** soit **3,8 nœuds**. L'idéal est de ne plus changer la vitesse du bateau pendant toute la durée de l'acquisition (y compris pendant les virages), il faut éviter au maximum les accélérations et ralentissements.
- Eviter les changements brusques de cap et les virages trop serrés.
- Eviter de faire tanguer le bateau. Le transducteur doit être le plus horizontal possible.
- La profondeur doit être comprise entre 1,5 et 35-40 mètres (Poulain et Guillard 2011a) pour que le système soit opérationnel.

Dans le cas d'une vitesse inférieure à la vitesse conseillée, la qualité des acquisitions n'est pas dégradée mais il existe des zones de recouvrement, donc une redondance de l'information. Dans le cas d'une vitesse plus rapide, les points deviennent plus espacés. La vitesse ne doit néanmoins pas dépasser 8 nœuds (14,8 km.h⁻¹) afin de garantir la validité des résultats.

Dans les cuvettes des plans d'eau profonds (> 35-40 m), le substrat dominant est la vase (Pourriot et Meybeck 1995) dû au phénomène de sédimentation et à l'éloignement des berges. La limite d'utilisation fonction de la profondeur est donc peu contraignante dans le cadre de la discrimination de la nature du fond pour des aspects typologiques, sauf dans quelques cas particuliers.

Pour aider à mettre en place une stratégie d'échantillonnage, le paragraphe suivant fournit quelques idées et ordres de grandeur.

4.4. Quelques clefs pour la mise en place d'une stratégie d'échantillonnage

La stratégie d'échantillonnage décrite ici est donnée à titre indicatif et doit être adaptée au plan d'eau étudié, aux objectifs de l'étude et aux moyens mis à disposition. Elle est inspirée de la stratégie

d'échantillonnage mise au point par Alleaume, Lanoiselee, et Argillier (2010) afin de décrire la bathymétrie d'un lac.

Les trajectoires suivies lors de l'acquisition des données peuvent être classées en trois types (Figure 10).

- Radiales en créneaux perpendiculaires à la plus grande longueur du plan d'eau à espacement fixe (Figure 10a).
- Une à trois radiales centrales pour comparer les écarts de mesures à un même point (Figure 10b).
- Un parcours sur le pourtour du lac (Figure 10c).

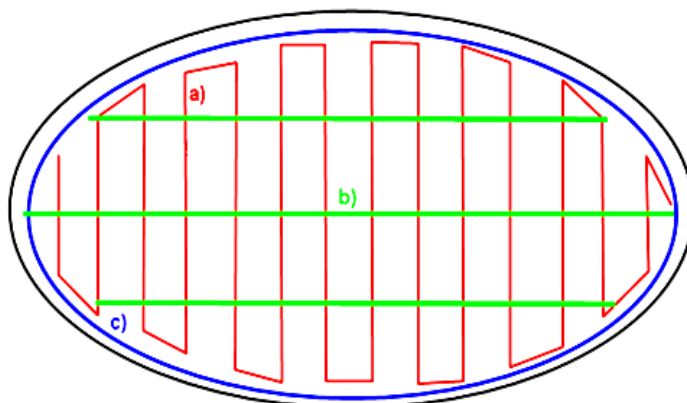


Figure 10 : Schéma théorique d'échantillonnage. (d'après Alleaume, Lanoiselee, et Argillier 2010). a) transects b) radiales centrales c) pourtour du lac

L'espacement entre les transects dépend de l'objectif de l'étude ainsi que du temps imparti.

- Distance inter-transects minimale :

La surface « insonifiée » dépend de la profondeur et de l'angle d'émission du sondeur (Tableau 2). Pour qu'il n'y ait pas de recouvrement, la distance inter-transects doit être au moins supérieure au diamètre insonifié au fond. La présence de zones de recouvrements ne nuit pas à la qualité des données mais augmente le temps d'échantillonnage sans apport d'information supplémentaire.

Tableau 2 : Equivalences entre profondeur et surface couverte par le sondeur

profondeur (m)	diamètre insonifié au fond (m)	surface insonifiée au fond (m ²)
5	0,87	0,601
10	1,75	2,404
15	2,62	5,41
20	3,50	9,62
25	4,37	15,03
30	5,25	21,64
35	6,12	29,46

- Distance inter-transects maximale :

La qualité de l'interpolation dépend de cette distance. Des tests ont été effectués en comparant la qualité des substrats prédits en fonction de la distance inter-transects (Figure 11). Pour réaliser ce test, des enregistrements ont été réalisés sur une partie du lac du Bourget avec une distance inter-transects

de 25 m. Ce test ne prend en compte que les radiales en créneaux perpendiculaires à la plus grande longueur du plan d'eau (Figure 10a).

La prédiction « témoin » (100% de substrat correctement prédit) est définie pour l'espacement inter-transects minimal (25 m). Pour chaque espacement inter-transects, les substrats prédits sont comparés aux substrats témoins et le pourcentage de substrats identique est enregistré (Figure 11). Sur le graphique apparaissent des augmentations du pourcentage de substrat correctement prédit malgré des transects plus éloignés. Il s'agit en réalité d'un artefact dû à la taille de la zone d'échantillonnage, délimitée entre le premier et le dernier transect. En effet, en ne sélectionnant que peu de transects, la taille de la zone d'échantillonnage peut varier de manière assez importante. Lorsqu'elle est inférieure à celle du témoin, cela réduit le nombre de substrats similaires. Lorsque cette zone d'échantillonnage a une taille proche de celle du témoin, le nombre de substrats potentiellement identiques augmente sensiblement.

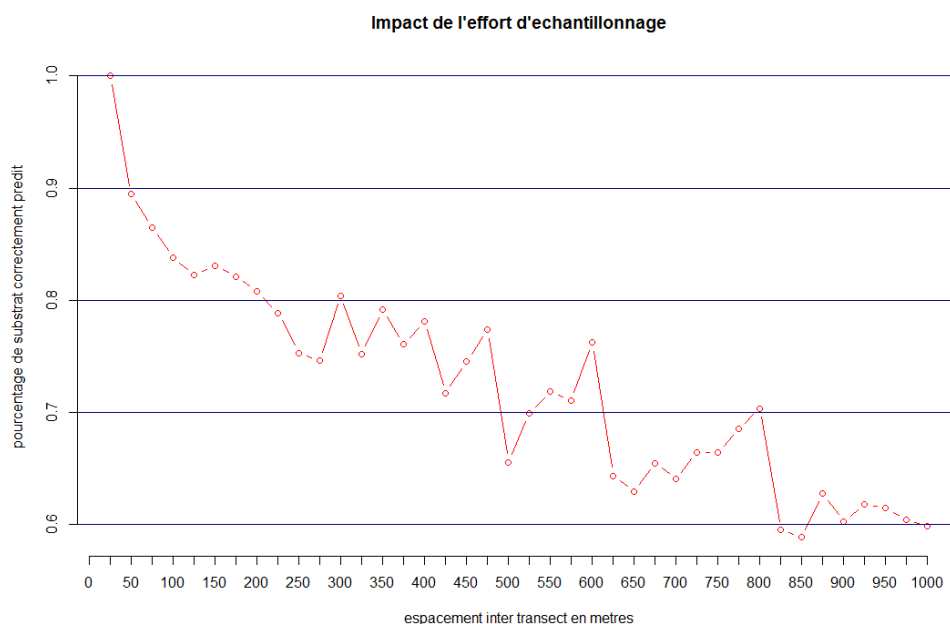


Figure 11 : Impact de la distance inter-transects sur la prédiction des substrats, test réalisé sur une partie du lac du Bourget

Une augmentation de la distance entre transects réduit la qualité de l'interpolation mais permet de diminuer le temps d'échantillonnage. Il s'agit donc d'un compromis à trouver en fonction du temps imparti et des objectifs de l'étude. On voit cependant que pour garder un pourcentage de substrats correctement prédits par rapport au témoin supérieur à 80%, il est nécessaire de conserver une distance inter-transects inférieure ou égale à 200-225 m, pour cette partie du lac du Bourget. Le lac du Bourget a été choisi pour cette expérience car il présente une importante hétérogénéité de substrats. Cependant, la distance maximale inter-transects dépend de la nature du fond du lac étudié et est donc à adapter. Une zone avec un fond hétérogène nécessite des transects plus rapprochés que lorsque le fond est plus homogène.

Lorsque la profondeur dépasse les limites d'utilisation du système RoxAnn® (zone centrale trop profonde par exemple), il peut être nécessaire d'interrompre les transects ou de contourner une zone. Les formes de plan d'eau très irrégulières peuvent également faire l'objet d'un « découpage » permettant la mise en œuvre de parcours en transects.

La stratégie d'échantillonnage peut se révéler complexe à établir. Outre les quelques bases posées ici, l'utilisation de logiciels de SIG (Système d'Information Géographique) peut être utile. Le Tableau 3 donne une estimation, parfois grossière, pour un échantillonnage théorique dans le cas de quelques

lacs types. Cet échantillonnage est composé d'une radiale centrale, de transects perpendiculaires à la radiale centrale et du pourtour du lac. Ne sont pris en compte que les temps de mesures, pas les temps de trajets entre deux zones d'échantillonnage. Les zones ayant une profondeur supérieure à 40 m ne sont pas échantillonnées et la vitesse du bateau est considérée comme constante et égale à 7 km.h⁻¹.

Tableau 3 : Temps d'échantillonnage théoriques pour quelques lacs types

Nom du plan d'eau	Surface (km ²)	Profondeur maximale (m)	Forme	Estimation du temps d'échantillonnage théorique	
				Espacement inter-transect de 100 m	Espacement inter-transect de 200 m
Etang d'Entressen	0,91	8	Régulière	2h01	1h31
Lac de Pareloup	12,3	40	Irrégulière	31h09	23h16
Lac du Bourget	44,5	145	Régulière	42h04	27h30
Lac du Der-Chantecoq	48	18	Irrégulière	68h23	46h20

5. Traitement des données

Le traitement des données proposé s'effectue sous R (R Core Team 2016), téléchargeable sur le site cran.r-project.org. Les packages utilisés sont « akima » (Akima et Gebhardt 2015), « caret » (Max Kuhn 2016), « e1071 » (Meyer et al. 2017), « geosphere » (Hijmans, Williams, et Vennes 2016), « lubridate » (Grolemund et Wickham 2011), « maptools » (Bivand et Lewin-Koh 2016), « maps » (Brownrigg et al. 2016), « randomForest » (Liaw et Wiener 2002), « rgdal » (Bivand, Keitt, et Rowlinson 2016), « rgl » (Adler, Murdoch, et al 2017), « spatstat » (Baddeley, Rubak, et Turner 2015), « stringr » (Wicham 2016) et « tcltk » (R Core Team 2016). Ce script a été écrit avec la version 3.3.3 de R.

5.1. Exportation et mise en forme des données enregistrées

5.1.1. Exportation des données RoxAnn au format texte

Il est possible d'avoir accès aux données brutes enregistrées par RoxAnn® en passant par l'exécution du programme `dbcscit.exe` (C:\ROX2TEXT\dbcscit.exe).

Afin de traiter les données enregistrées, il est plus simple de travailler avec les données brutes, dans un format utilisable par d'autres logiciels que RoxAnn®. L'extraction des données passe par la sélection du répertoire choisi à l'aide de `Multidb.exe` puis par le lancement de `dbcscit.exe`. Une fenêtre apparaît indiquant le nombre de points qui ont été convertis ainsi que le chemin du fichier créé : C:\ROXMAP\database.txt. Ce fichier se présente sous la forme d'un tableau à huit colonnes qui correspondent, de gauche à droite : au « code RoxAnn® » (il correspond à une nature de substrat particulière), latitude, longitude, profondeur, E1², E2², heure d'acquisition, date d'acquisition. Le nombre de lignes est lui fonction du nombre de points acquis. Les colonnes 5 et 6 affichent donc respectivement les valeurs de E1 et E2 élevées au carré (Chevillon, 2001). Il faut donc prendre leur racine pour retrouver les valeurs affichées sous « RoxMap32 Scientific ».

Remarque : Le programme va extraire toutes les données brutes comprises dans le répertoire sélectionné avec `Multidb.exe`. Même si plusieurs parcours sont enregistrés dans le même répertoire, il n'y aura qu'un fichier texte en sortie, c'est à l'opérateur de le diviser en servant de l'heure et de la date par exemple. Il peut donc être intéressant d'enregistrer les acquisitions des phases de calibration et de mesures dans deux répertoires distincts.

5.1.2. Formatage des données pour le script R

Le script R nécessite un formatage particulier des données pour fonctionner correctement. Il est cependant possible de modifier le script de chargement des données si les données ne peuvent être mises en forme au format proposé.

Tout d'abord, il faut distinguer deux jeux de données : celui de calibration et celui de mesures. Ils doivent être enregistrés dans deux fichiers distincts.

Le fichier de mesures doit avoir le format donné automatiquement lors de l'exportation des données RoxAnn®. Il s'agit donc d'un fichier texte (.txt) avec 8 colonnes (ordre inchangé) non nommées et dont les séparateurs de champs sont la tabulation et le séparateur décimal le point.

Le fichier de calibration ressemble en tous points au fichier de mesures si ce n'est qu'une colonne est ajoutée (à droite de toutes les autres) comportant la nature du substrat. Cette opération peut être facilement réalisée via Excel. Les noms de substrats doivent suivre une nomenclature précise (Tableau 1). Si deux substrats sont présents, ils sont notés *substrat1_substrat2*. Ce fichier ne comporte pas non plus de noms de colonnes. Lors de l'enregistrement du fichier, il est impératif de conserver le même formatage (fichier « .txt », séparateur : tabulation, décimales : point). Il est possible -mais néanmoins délicat- d'ajouter d'autres substrats que ceux présentés Tableau 1 en se référant à l'Annexe 3 : Réglages faciles du script R.

5.2. Méthodes proposées pour le traitement des données

L'objectif du traitement des données est d'aboutir à une carte où, en chaque point de la zone d'étude aura été déterminée la nature du substrat. Cependant, tous les points ne peuvent être mesurés. Au niveau des points de calibration, la nature exacte du substrat est connue. Au niveau des points de mesure, le calcul de E1, E2 et de la profondeur apportent une information qui permet de prédire la nature du substrat. En ce qui concerne les points non mesurés, le substrat doit être estimé en se basant sur l'information donnée par les points voisins.

La méthode de prédiction proposée se déroule en deux phases : l'estimation de la nature des substrats aux points mesurés mais non calibrés puis aux autres points.

Les points de calibration permettent d'établir une relation entre le triplet (E1, E2, profondeur) et la nature du substrat via un modèle de forêt d'arbres décisionnels (random forest). Ce modèle est alors appliqué à l'ensemble des triplets connus et permet ainsi une prédiction des substrats le long de la trajectoire.

L'estimation du substrat en d'autres points se base sur l'interpolation. Ce sont les points voisins du point dont on cherche le substrat qui fournissent l'information. Comme il n'est pas possible d'interpoler une variable qualitative, le script interpole les données de présence/absence pour obtenir des cartes de probabilité de présence de chaque substrat. Puis, en chaque point, sont considérés comme effectivement présents les substrats ayant une probabilité de présence supérieure ou égale à 50% (seuil modifiable, Annexe 3 : Réglages faciles du script R), ce qui permet d'obtenir une carte de répartition des substrats.

5.3. Utilisation du script R

Le script R proposé permet d'obtenir des cartes décrivant la profondeur et la nature du substrat sur la zone échantillonnée. Le script R retourne également un tableau utile pour l'édition des carrés RoxAnn® et un fichier récapitulatif de quelques données d'entrée et de sortie.

Le premier paragraphe du script, l'étape 0, nécessite l'intervention de l'opérateur pour renseigner le chemin d'accès, le nom des fichiers, etc. Les paragraphes suivants sont a priori autonomes mais une erreur peut nécessiter l'intervention d'un opérateur (Annexe 4 : Résolution de quelques problèmes possibles lors de l'exécution du script R). C'est pourquoi ce script a été annoté de la manière la plus complète possible en mettant en avant les paramètres facilement modifiables (Annexe 3 : Réglages faciles du script R). Juste avant le premier paragraphe, deux lignes permettent de nettoyer l'espace de travail R en supprimant les variables et en fermant les fenêtres graphiques.

- Préparation du répertoire de travail

Dans le répertoire de travail doit se trouver les bases de données de calibration et de mesure formaté comme expliqué au paragraphe 5.1.2 ainsi que la base de données Carthage qui comprant la majorité des plans d'eau français (de France métropolitaine uniquement). Cette base de données est disponible gratuitement à l'adresse : services.sandre.eaufrance.fr (« Sandre - Portail national d'accès aux référentiels sur l'eau » 2017)

Une fois téléchargée, la base de données Carthage doit être décompressée dans le répertoire de travail, et se décompose alors en 8 fichiers, tous intitulés « PlanEau » mais avec des extensions différentes. Tous ces fichiers doivent rester dans le répertoire de travail. C'est à partir de cette base de données que sera extrait le fond de carte du lac étudié.

- Que faire à l'étape pour lancer le script :

Démarrer l'application R. Ouvrir le script en sélectionnant « Fichier » puis « Ouvrir un script... » et en choisissant le script R dans la boîte de dialogue. Le lancement du script se fait ensuite en sélectionnant dans « Edition » l'opération « Exécuter tout ». Il est également possible de sélectionner la totalité du script (via un Ctrl+A par exemple) puis d'exécuter la sélection par un Ctrl+R ou « Edition » puis « Exécuter la sélection ».

Commence alors un dialogue avec l'opérateur afin de récupérer les données nécessaires à l'exécution du script.

La première boîte de dialogue informe que le fichier à sélectionner est celui de **calibration**. En cliquant sur « Continuer », une fenêtre s'ouvre, permettant de parcourir les fichiers de l'ordinateur et donc de sélectionner le fichier de calibration, présent dans le répertoire de travail

Une seconde boîte de dialogue s'ouvre, informant que le prochain fichier à sélectionner est celui de **mesures**. De la même manière, l'opérateur peut choisir le fichier de mesures, toujours présent dans le répertoire de travail.

Il est important que ces fichiers soient dans le répertoire de travail, avec la base Carthage décompressée car le chemin d'accès est récupéré par ces premières sélections.

Le script ouvre ensuite une autre boîte de dialogue, demandant la profondeur à laquelle le transducteur est immergé. Le résultat doit être inscrit dans cette boîte, en mètre et avec pour séparateur décimal un point. Si le transducteur est immergé à 40 cm, la notation est 0.40. Ce résultat est validé en appuyant sur « OK ».

Le script demande également la profondeur maximale à laquelle ont été réalisés les enregistrements. Compte tenu des limites du système, cette profondeur ne peut excéder 40 m. Si le lac est moins profond que 40 m, cette donnée correspond directement à la profondeur du lac. Toutes les données excédant cette profondeur sont éliminées.

Il faut ensuite renseigner le nom du plan d'eau afin d'en retrouver le fond de carte. Cependant, les accents et majuscules n'existant pas dans la base Carthage chargée dans R, il est important que le nom soit exempt d'accents et de majuscules. Si le nom comporte un accent, il est possible de n'écrire qu'une partie du nom. Si plusieurs lacs répondent à ce critère, la recherche se fera sur les coordonnées GPS. En cas de doute, il est également possible de laisser ce champ vide.

Le nom indiqué pour la recherche de fond de carte n'étant pas toujours esthétique, le script demande l'intitulé à indiquer dans les titres et les noms de fichiers. Ce nom n'a aucune influence sur l'exécution du script.

Le reste du script se déroule sans qu'aucune information ne soit demandée à l'opérateur. Lors de la première exécution, un certain nombre de packages vont être installés, ce qui nécessite des droits d'écriture ainsi qu'un certain temps (10-15 min voire plus).

Les sorties du script sont automatiquement enregistrées dans le répertoire de travail. Les cartes de bathymétrie et de nature des substrats ainsi que les carrés RoxAnn s'affichent également dans la console R. Si l'exécution du script renvoie des erreurs, les solutions peuvent se trouver dans Annexe 4 : Résolution de quelques problèmes possibles lors de l'exécution du script R. Les réglages qui peuvent être facilement fait dans le script sont explicités dans Annexe 3 : Réglages faciles du script R. Les principales étapes du script sont décrites dans Annexe 5 : Description du script R; les modèles choisis sont explicités dans Annexe 6 : Choix des modèles utilisés lors de la construction des cartes.

5.4. Sorties du script R

5.4.1. La carte de bathymétrie

La carte de bathymétrie résulte d'une interpolation linéaire entre les profondeurs mesurées aux différents points de mesure. Cette carte est affichée dans une fenêtre graphique et enregistrée aux formats PDF et JPEG sous le nom *carteProfondeurNomLac* (Figure 12). Il est possible que les points

mesurés soient en léger décalage avec le fond de carte. Ce phénomène peut être dû à une imprécision du fond de carte ou des mesures GPS.

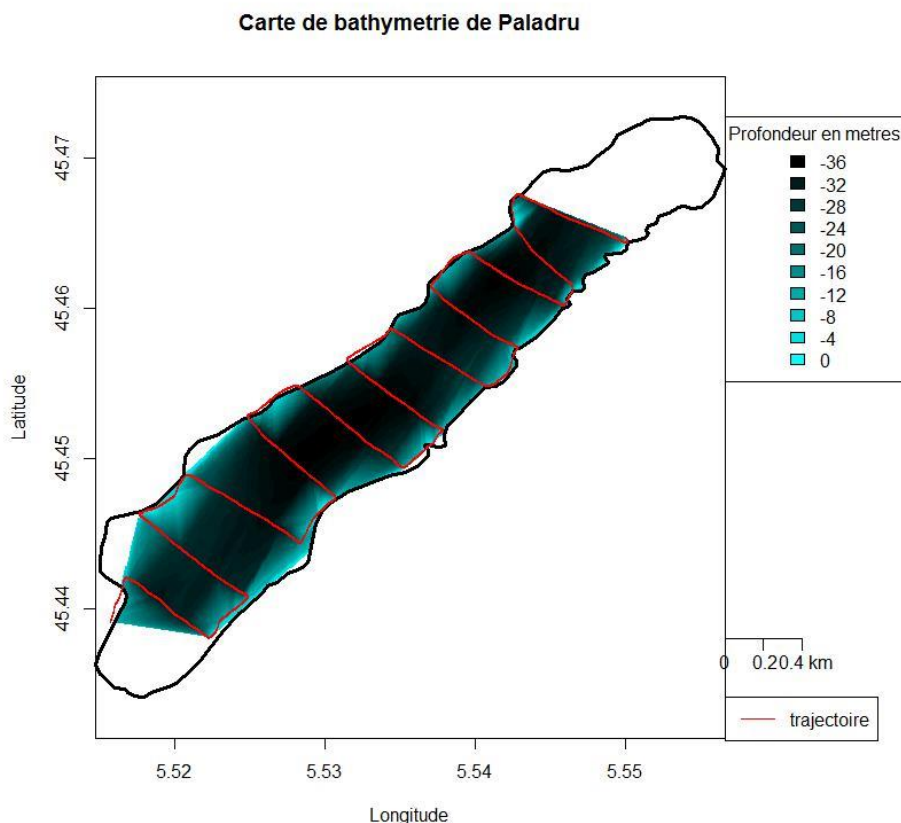


Figure 12 : Exemple de carte de bathymétrie obtenue

Il est important de savoir que l'interpolation n'a de sens que dans la zone d'étude, c'est-à-dire dans les limites des transects dont la zone au sud-est du dernier transect ne fait pas partie. L'interpolation n'a en effet pas de distance limite et des problèmes peuvent apparaître lorsque la zone d'étude ne comprend pas la totalité du lac. Une solution à ce problème est le recours au krigeage qui fait intervenir une notion de distance. Cependant, cette méthode nécessite l'ajustement manuel d'un variogramme, ce qui est incompatible avec un script automatique. Un opérateur avec des compétences en R et capable d'ajuster un variogramme pourrait néanmoins modifier le script pour utiliser le krigeage. Il est également possible de traiter les données via un logiciel de SIG avec un système de krigeage adapté.

5.4.2. La matrice des substrats prédits

L'application du modèle de forêt d'arbres décisionnels (random forest), calibré sur le jeu de calibration, permet de prédire un substrat pour chaque triplet (E1, E2, profondeur) mesuré. La matrice des substrats prédits *tableSubstrat.csv* regroupe, pour chaque point de mesure, ses coordonnées, la profondeur, E1, E2 et le substrat prédit par le modèle.

5.4.3. Les cartes de probabilité de présence par substrat

Des cartes sont créées, présentant le résultat de l'interpolation linéaire pour chaque substrat, entre des points de présence-absence. Le résultat est donc compris entre 0 et 1 et peut être interprété comme une probabilité de présence du substrat (Figure 13). C'est la superposition de ces cartes qui forme la carte finale de répartition des substrats. Les cartes sont enregistrées au format JPEG sous le nom *probaPresenceSubstrat1*.

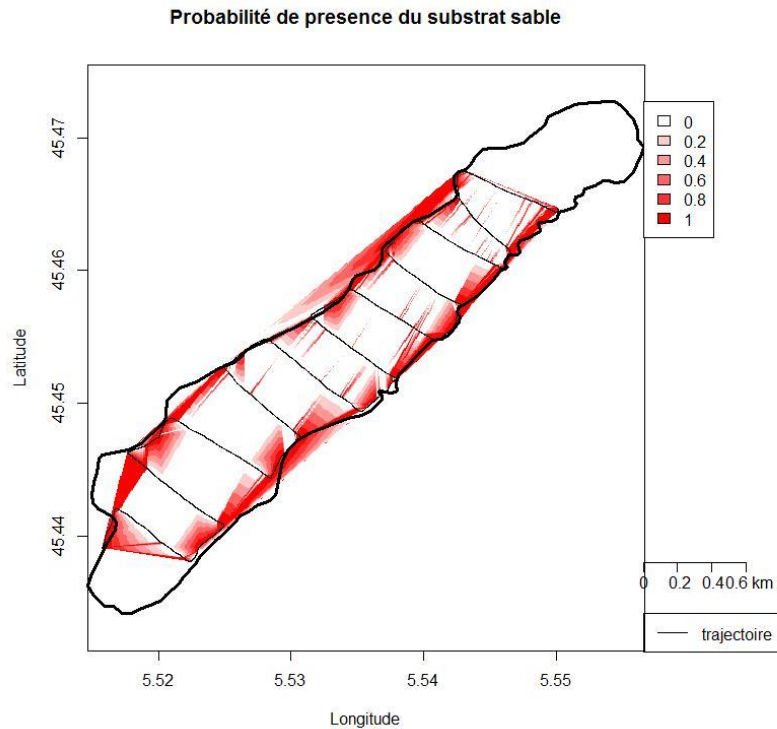


Figure 13 : Exemple de carte de probabilité de présence d'un substrat (gravier)

5.4.4. La carte de répartition des substrats

Une carte de répartition des substrats est éditée (Figure 14) sur laquelle sont indiqués comme présents les substrats avec une probabilité supérieure au seuil fixé (par défaut, 50%). Lorsque deux substrats sont dans ce cas, le substrat est noté substrat1_substrat2. Cela signifie qu'à cet endroit se trouve le substrat1 et/ou le substrat2 avec une probabilité supérieure ou égale à 50%. Si davantage de substrats sont dans ce cas, il n'est pas possible de les distinguer, ce qui amène à la notation de mélange. Une carte est donc affichée dans une fenêtre graphique de R et enregistrée aux formats PDF et JPEG sous le nom *carteSubstratNomLac*. Les différentes étapes conduisant à l'obtention de cette carte sont décrites en Annexe 5 : Description du script R. En plus des substrats prédits, les substrats estimés par le modèle le long de la trajectoire sont affichés. Cependant, la légende restant la même, il est parfois difficile de les distinguer. C'est pourquoi est également tracé le long de la trajectoire un fin trait noir. Les points de calibration sont représentés par des croix.

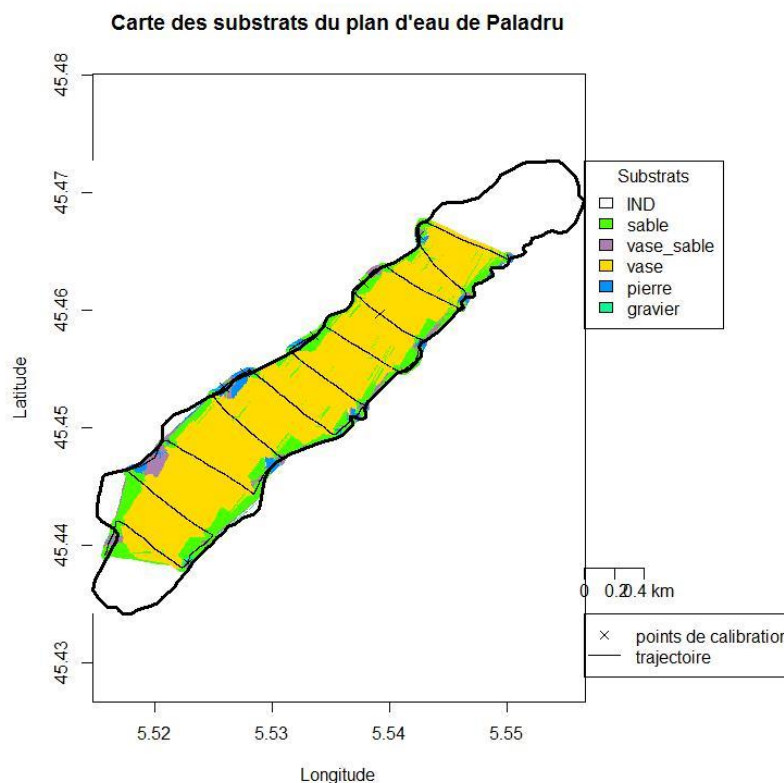


Figure 14 : Exemple de carte de répartition des substrats

5.4.5. Carte 3D de répartition des substrats

Cette étape permet d'intégrer latitude, longitude, profondeur et substrat dans une même carte. Cette carte s'affiche dans une fenêtre graphique R où il est possible de la tourner (clic gauche) et de zoomer (clic droit) afin d'en visualiser les différents aspects. Un enregistrement est également réalisé au format PNG, sous le nom de *carte3DNomLac*, mais n'est alors plus modifiable. Les échelles n'étant pas les mêmes selon les axes, la carte peut donner une image faussée de la bathymétrie du plan d'eau.

5.4.6. Graphique 3D de représentation des substrats

Le logiciel RoxMap représente les substrats dans un graphique E1 fonction de E2. Avec le modèle random forest, Les substrats sont prédits en fonction de leurs valeurs de E1, E2 et de profondeur. Les visualiser nécessite donc l'utilisation d'un graphique 3D. Ce graphique peut être tourné par simple clic gauche et le zoom est contrôlé par le clic droit. Ce graphique est également enregistré au format PNG sous le nom *graph3D*.

5.4.7. Les sorties utiles à l'édition des carrés RoxAnn

Afin de faciliter l'édition des carrés RoxAnn®, le script R renvoie deux objets. Le premier est un tableau au format .csv qui contient les coordonnées des carrés RoxAnn®, propres au système étudié. Le second est une image au format JPEG qui présente les carrés tels qu'ils apparaîtront dans RoxAnn® après édition, ainsi que les points de calibrations dans un graphique $E1 = f(E2)$ (Figure 15).

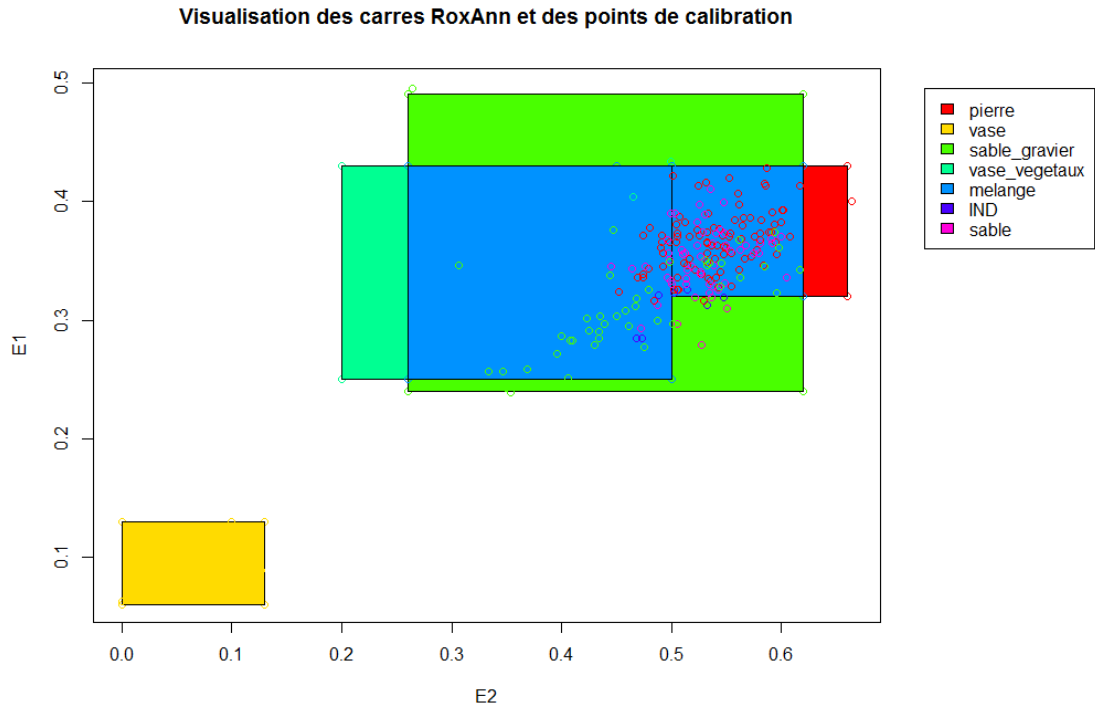


Figure 15 : Exemple de superposition des carrés RoxAnn® et des points de calibration

5.4.8. Fichier récapitulatif

Le script édite également un fichier récapitulatif au format texte. Ce fichier contient :

- Des données concernant la vitesse d'acquisition : vitesse moyenne, maximale ainsi que l'écart-type. Ces informations permettent de valider que les acquisitions ont été réalisées dans de bonnes conditions, du moins en ce qui concerne la vitesse. Une vitesse trop élevée peut entacher la validité des résultats.
- L'estimation de l'efficacité du modèle lors de la prédiction des substrats le long de la trajectoire. Cette estimation est réalisée en comparant, dans le jeu de validation (qui représente la moitié du jeu de calibration), les substrats réels et les substrats prédits par le modèle, alors calibré sur le jeu d'apprentissage (composé de l'autre moitié du jeu de calibration).
- Un récapitulatif des substrats estimés avec notamment, leur nombre et, pour chaque substrats, le pourcentage de surface qu'il représente (hors zones indifférenciées) ainsi que sa profondeur moyenne. Cette dernière donnée étant calculée uniquement le long de la trajectoire, elle peut être manquante (alors notée « NaN ») pour certains substrats.

5.5. Edition des carrés RoxAnn®

Le diagramme fourni par défaut est standard à tous les systèmes RoxAnn®. Afin d'améliorer la prédiction en temps réel du substrat dont on mesure le couple (E1, E2), il est possible dans le logiciel «Replay32 Scientific» d'éditer les carrés RoxAnn, c'est à dire de redéfinir les limites des différents carrés RoxAnn® ou « RoxAnn® Box » propres à sa base de données

L'édition des carrés RoxAnn® s'effectue à partir de l'onglet « Edit » situé en 1 (Figure 16) qui permet de faire apparaître les options de transformation (Figure 17).

La première opération à effectuer est d'ajuster les échelles des deux axes du diagramme en fonction des valeurs min et max de E1 et E2 rencontrées lors des acquisitions. Ceci permet d'augmenter la précision lors de la construction des différents carrés RoxAnn® et s'effectue en cliquant sur « Scales »

(2 Figure 17) et en ajustant les extrema des deux axes.

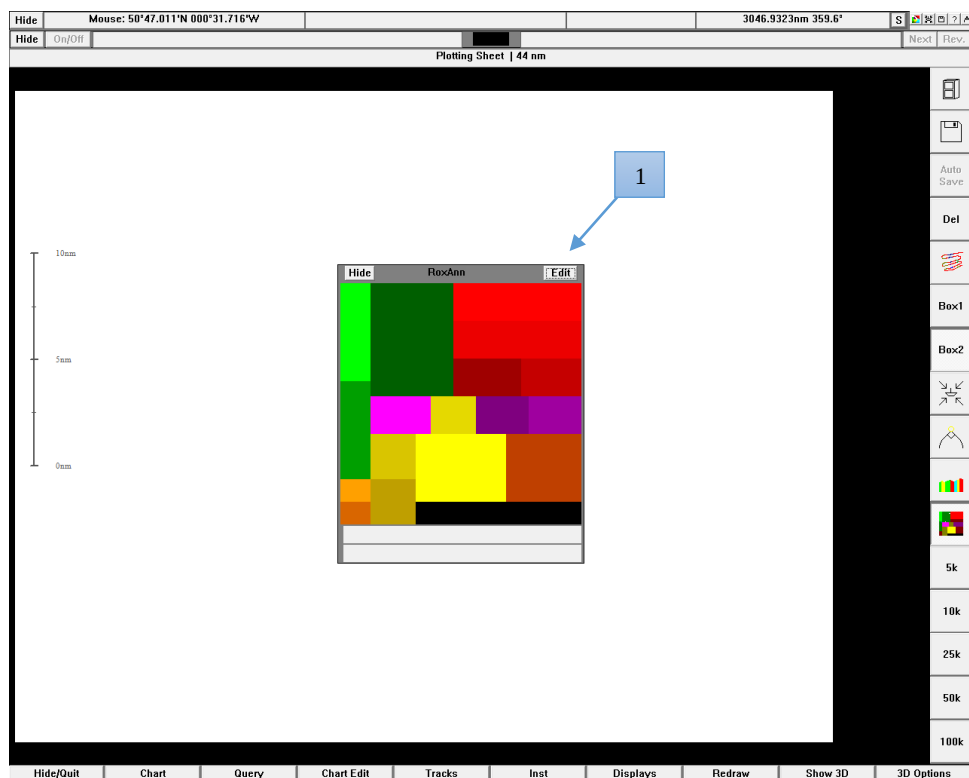


Figure 16 : Ecran de Romap32 Scientific

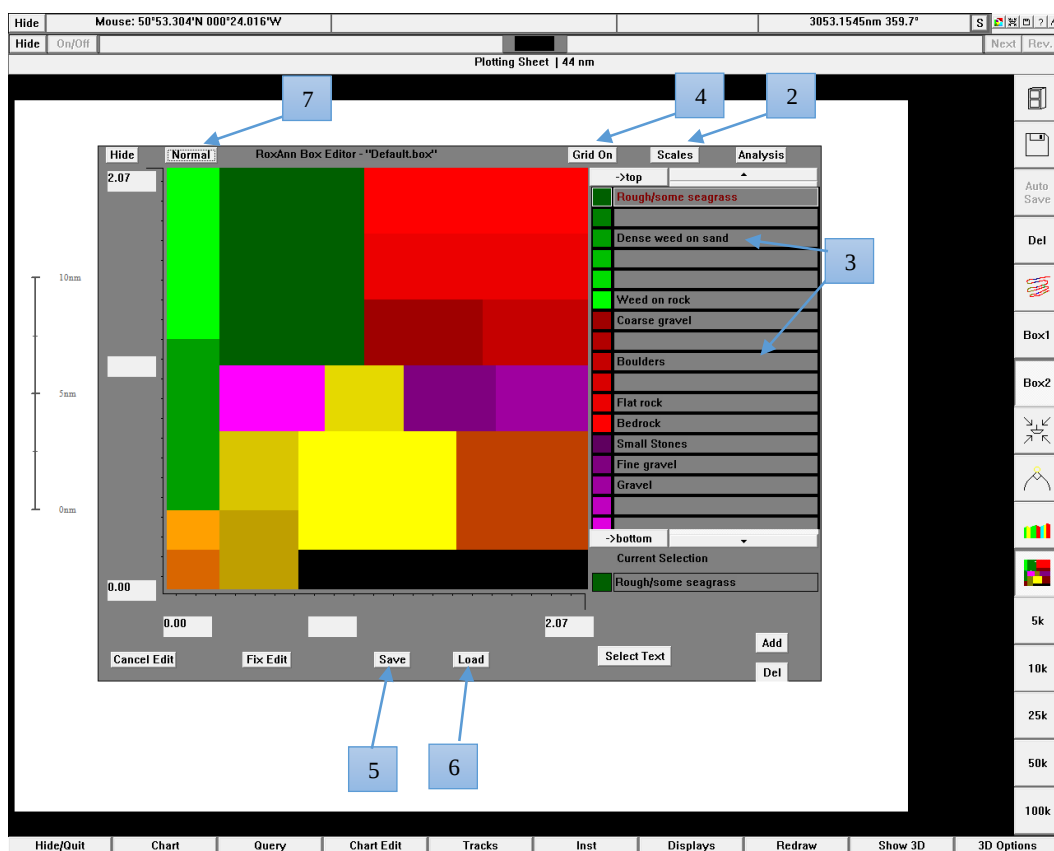


Figure 17 : Ecran d'édition des carrés RoxAnn®

Pour créer un carré RoxAnn®, il faut sélectionner un type de substrat (3 Figure 17) puis cliquer sur un des coins du carré (les coordonnées de la souris s'affichent au niveau des axes) et ne relâcher que dans le coin opposé. Pour construire une nouvelle table de carrés RoxAnn®, il est conseillé de commencer par effacer les carrés précédents en créant un carré du substrat « (?) » représenté en noir sur la totalité du diagramme. Cette couleur indique un substrat inconnu ou des valeurs de couple (E1 ; E2) jamais atteintes.

Les coordonnées des RoxAnn® Box sont une des sorties du script R. Il est possible de les récupérer en n'exécutant que les étapes 0 et 6. Le tableau ainsi enregistré au format .csv donne les coordonnées de chaque carré en x (E2) et y (E1). Le tableau rappelle également en dernière ligne les extrema de E1 et E2, ce qui est utile pour adapter les échelles. Les RoxAnn® Box doivent être créées dans l'ordre fourni par le tableau afin que les zones de recouvrements soient attribuées au bon substrat. Le choix

du nom et de la couleur du substrat (3) peut différer du substrat réel. Dans ce cas, une grille de correspondance substrat réel-substrat enregistré dans RoxAnn® peut être nécessaire.

En sélectionnant « Grid on » (4), une grille de 32x32 apparaît sur le diagramme. Chaque carré représente une unité inséparable qui ne peut représenter qu'un seul substrat. C'est donc la visualisation de la précision de cet outil.

Le diagramme ainsi créé peut être enregistré via « Save » (5) pour être réédité ou utilisé. La récupération d'un diagramme précédemment enregistré se fait par le bouton « Load » (6). Une fois l'édition terminée, le retour au mode habituel se fait en cliquant sur « Normal » (7). Le nouveau diagramme peut ensuite être utilisé dans RoxMap.

6. Conclusion

Le document présente donc les différentes étapes à suivre afin d'obtenir une cartographie d'un plan d'eau -ou fraction d'un plan d'eau- à l'aide du système RoxAnn GD-X. Ce système est particulièrement adapté à l'étude des plans d'eau mais présente des contraintes. En effet, l'échantillonnage doit se limiter à des profondeurs comprises entre 1,5 et 35-40 mètres et doit être effectué à une vitesse optimale de 3,8 nœuds. La stratégie d'échantillonnage à mettre en œuvre doit être le résultat d'un compromis entre la qualité du résultat final et le temps imparti, tout en s'adaptant aux spécificités du plan d'eau étudié et aux objectifs de l'étude.

Les résultats obtenus via le script R peuvent être inexacts si des erreurs ont été rencontrées lors de l'exécution du script. Ces résultats ne sauraient en aucun cas prétendre représenter de manière parfaite les fonds de la zone étudiée. Leur fiabilité est dépendante de la qualité des données acquises, tant lors de la calibration que des mesures. Il peut donc être nécessaire de comparer les cartes obtenues avec des données connues et fiables, récupérées auprès d'acteurs locaux ou d'études antérieures par exemple.

Ce script peut être utilisé dans différents cadres, tels que le suivi du fond d'un plan d'eau (dans le cas de programmes de restauration par exemple) ou la comparaison entre plans d'eau. Les données obtenues d'après le script peuvent également être intégrées dans un système de modélisation. Il est aussi possible d'établir des liens entre les substrats prédits et des habitats potentiels, afin d'avoir une cartographie ou un suivi de différents écosystèmes. Les résultats peuvent également être utilisés afin de développer des indicateurs pour connaître et suivre l'état écologique des plans d'eau.

7. Glossaire

Zone d'étude : Zone comprise entre les différents points de mesures

8. Sigles & Abréviations

DCE : *Directive Cadre sur l'Eau* (European Commission 2000)

GPS : *Global Positioning System*, système de géo-positionnement par satellite

SIG : *Système d'Information Géographique*, système d'information conçu pour recueillir, stocker, traiter, analyser, gérer et présenter tous les types de données spatiales et géographiques

9. Bibliographie

- Adler, Daniel, Duncan Murdoch, et al. 2017. *rgl: 3D Visualization Using OpenGL* (version R package version 0.97.0.). <https://CRAN.R-project.org/package=rgl>.
- Agence de l'eau Loire-Bretagne. 2006. « Le prélèvement d'échantillons en rivière, techniques d'échantillonnage en vue d'analyses physico-chimiques ». Agence de l'eau Loire-Bretagne.
- Akima, Hiroshi, et Albrecht Gebhardt. 2015. *akima: Interpolation of Irregularly and Regularly Spaced Data* (version R package version 0.5-12). <https://CRAN.R-project.org/package=akima>.
- Alleaume, Samuel, Cédric Lanoiselee, et Christine Argillier. 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>.
- Baddeley, Adrian, Ege Rubak, et Rolf Turner. 2015. *Spatial Point Patterns: Methodology and Application with R*. London. <http://www.crcpress.com/Spatial-Point-Patterns-Methodology-and-Applications-with-R/Baddeley-Rubak-Turner/9781482210200/>.
- Bivand, Roger, Tim Keitt, et Barry Rowlinson. 2016. *rgdal: Bindings for the Geospatial Data Abstraction Library* (version 1.2-5). <https://CRAN.R-project.org/package=rgdal>.
- Bivand, Roger, et Nicholas Lewin-Koh. 2016. *maptools: Tools for Reading and Handling Spatial Objects* (version R package version 0.8-40). <https://CRAN.R-project.org/package=maptools>.
- Brownrigg, Ray, Allan R. Wilks, Richard A. Becker, Thomas P. Minka, et Alex Deckmyn. 2016. *maps: Draw Geographical Maps* (version 3.1.1). <https://CRAN.R-project.org/package=maps>.
- Chevillon, Christophe. 2001. « Caractérisation des types de fonds et habitats benthiques par classification hydro-acoustique d'ANS LE LAGON SUD-Ouest de Nouvelle-Calédonie ». IRD.
- Cholwek, Gary, John Bonde, Xing Li, Carl Richards, et Karen Yin. 2000. « Processing RoxAnn Sonar Data to Improve Its Categorization of Lake Bed Surficial Substrates† ». *Marine Geophysical Researches* 21 (5): 409-21. doi:10.1023/A:1026525326823.
- Ehrhold, Axel. 2003a. « Cartographie des peuplements macro-benthiques par les méthodes acoustiques en domaine subtidal ». REBENT. IFREMER.
- . 2003b. « L'application des Systèmes Acoustiques de Classification Automatique des natures de Fonds pour la cartographie des habitats : SACLAF ». Fiche outil. IFREMER. <http://docplayer.fr/4586973-L-application-des-systemes-acoustiques-de-classification-automatique-des-natures-de-fonds-pour-la-cartographie-des-habitats-saclaf.html>.
- . 2004. « Projet REBENT : Cartographie des habitats benthiques dans les petits fonds côtiers à l'aide de méthodes acoustiques ». Phdthesis, Université de Caen. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00006680/document>.
- 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*.
- Furuno. 2017a. « Furuno LS 4100 Brochure ». Consulté le janvier 26. http://www.sonavision.co.uk/cust_images/products/products/manual_pdfs/LS4100%20Brochure.pdf.
- . 2017b. « Product Detail - 525ST-MSD ». Consulté le janvier 26. <http://www.furunousa.com/Products/ProductDetail.aspx?product=525ST-MSD>.
- Gob, Frédéric, Clélia Bilodeau, Nathalie Thommeret, Jérôme Belliard, Marie-Bernadette Albert, Vincent Tamisier, Jean-Marc Baudoin, et Karl Kreutzenberger. 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.
- Grolemund, Garrett, et Hadley Wickham. 2011. *Dates and Times Made Easy with lubridate*. Journal of Statistical Software. <http://www.jstatsoft.org/v40/i03/>.
- Guiron, François, et Philippe Ruiz. 2013. « Protocole d'utilisation du système RoxAnn en plan d'eau ». ONEMA-IRSTEA.
- Hamilton, L. J., P. J. Mulhearn, et R. Poeckert. 1999. « Comparison of RoxAnn and QTC-View acoustic bottom classification system performance for the Cairns area, Great Barrier Reef, Australia ». *Continental Shelf Research* 19 (12): 1577-97. doi:10.1016/S0278-4343(99)00020-5.
- Hijmans, Robert J., Ed Williams, et Chris Vennes. 2016. *Spherical Trigonometry* (version 1.5-5). <https://cran.r-project.org/web/packages/geosphere/geosphere.pdf>.
- Liaw, A., et M. Wiener. 2002. *Classification and Regression by randomForest*. <http://CRAN.R-project.org/doc/Rnews/>.

- Max Kuhn. 2016. *caret: Classification and Regression Training* (version R package version 6.0-73). <https://CRAN.R-project.org/package=caret>.
- Meyer, David, Evgenia Dimitriadou, Kurt Hornik, Andreas Weingessel, et Friedrich Leisch. 2017. *e1071: Misc Functions of the Department of Statistics, Probability Theory Group (Formerly: E1071)* (version version 1.6-8). TU Wien. <https://CRAN.R-project.org/package=e1071>.
- Murphy, L., T. Leary, et A. Williamson. 1996. « Standardizing Seabed Classification Techniques ». *Oceanographic Literature Review* 3 (43): 245.
- Orlowski, Andrej. 1986. « Application of multiple echoes energy measurements for evaluation of sea bottom type ». *Deep Sea Research Part B. Oceanographic Literature Review* 33 (3): 223. doi:10.1016/0198-0254(86)91089-7.
- Orr, H. G., A. R. G. Large, M. D. Newson, et C. L. Walsh. 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.
- Pinn, Eunice H., et M. R. Robertson. 1998. « The Effect of Bioturbation on Roxann, a Remote Acoustic Seabed Discrimination System ». *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 78 (3): 707-15. doi:10.1017/S0025315400044726.
- Poulain, Thomas, Christine Argillier, Muriel Gevrey, et Jean Guillard. 2010. « Caractérisation de la nature des substrats lacustres par hydroacoustique ». Rapport bibliographique. ONEAM-CEMAGREF.
- . 2011. « Identifying lakebed nature: is it feasible with a combination of echosounder and Sonar5-pro? ». *Advances in Oceanography and Limnology* 2 (1): 49-53. doi:10.1080/19475721.2011.565803.
- Poulain, Thomas, Christine Argillier, et Jean Guillard. 2010. « Classification des fonds lacustres par hydroacoustique ». Rapport bibliographique. ONEAM-CEMAGREF.
- Poulain, Thomas, et Jean Guillard. 2011a. « Etude de performances du système hydroacoustique RoxAnn GD-X permettant de faire de la classification des substrats subaquatiques : RoxAnn GD-X ». ONEMA-INRA.
- . 2011b. « Présentation et guide d'utilisation du système acoustique de classification des substrats lacustres : RoxAnn GD-X ».
- Poulain, Thomas, Jean Guillard, et Christine Argillier. 2011. « Détermination des substrats lacustres par hydroacoustique : application au suivi de qualité morphologique ». *Journal des Sciences Halieutique et Aquatique*, n° 3: 67-71.
- Pourriot, Roger, et Michel Meybeck. 1995. *Limnologie générale*. 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/>.
- Ruiz, Philippe, Julien Dublon, Thomas Poulain, et Jean Guillard. 2013. « Référentiel d'utilisation du système acoustique de classification des substrats en milieu lacustre : RoxAnn GD-X. Guide d'utilisation et d'exploitation des données ». ONEMA-INRA.
- « Sandre - Portail national d'accès aux référentiels sur l'eau ». 2017. Text. Consulté le janvier 30. <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.
- Sothoran, I. S., R. L. Foster-Smith, et J. Davies. 1997. « Mapping of marine benthic habitats using image processing techniques within a raster-based geographic information system ». *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 44, Supplement 1: 25-31. doi:10.1016/S0272-7714(97)80004-2.
- Wicham, Hadley. 2016. *stringr: Simple, Consistent Wrappers for Common String Operations* (version R package version 1.1.0). <https://CRAN.R-project.org/package=stringr>.

10. Table des illustrations

Figure 1 : schéma du fonctionnement global du système RoxAnn et du protocole de traitement des données (flèches en vert : sur le terrain, en rouge : lors du traitement <i>a posteriori</i>).....	5
Figure 2 : Le système RoxAnn GD-X® et ses différents composants (d'après Sonavision 2006)	10
Figure 3 : Traitement du signal pour calculer E1 et E2 (d'après Chevillon 2001).....	11
Figure 4 : Diagramme RoxAnn® (paramétré par défaut) avec quelques points de mesure	12
Figure 5 : Montage du système RoxAnn (source : Ruiz et al. 2013).....	15
Figure 6 : Montage assurant l'horizontalité du transducteur	16
Figure 7 : Echosondeur Furuno LS4100 et ses réglages.....	17
Figure 8 : Fenêtre vierge de RoxMap32 Scientific	19
Figure 9 : Ecran de RoxMap32 avec profil bathymétrique et carrés RoxAnn activés.....	20
Figure 10 : Schéma théorique d'échantillonnage. (d'après Alleaume, Lanoiselee, et Argillier 2010). a) transects b) radiales centrales c) pourtour du lac	23
Figure 11 : Impact de la distance inter-transects sur la prédiction des substrats, test réalisé sur une partie du lac du Bourget	24
Figure 12 : Exemple de carte de bathymétrie obtenue	29
Figure 13 : Exemple de carte de probabilité de présence d'un substrat (gravier)	30
Figure 14 : Exemple de carte de répartition des substrats.....	31
Figure 15 : Exemple de superposition des carrés RoxAnn® et des points de calibration	32
Figure 16 : Ecran de Romap32 Scientific	33
Figure 17 : Ecran d'édition des carrés RoxAnn®	33
Tableau 1 : Correspondances entre granulométrie et dénomination	22
Tableau 2 : Equivalences entre profondeur et surface couverte par le sondeur	23
Tableau 3 : Temps d'échantillonnage théoriques pour quelques lacs types.....	25

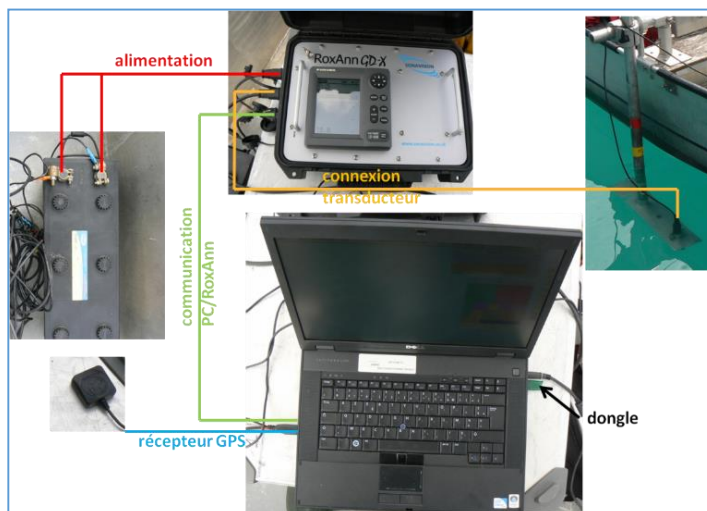
11. Annexe 1 : Fiche synthèse du protocole terrain

1. Initialisation du système

- Branchements

Les branchements doivent être effectués avant la mise sous tension et dans l'ordre décrit sur la photo ci-contre. L'ordinateur et l'échosondeur sont encore éteints.

Le transducteur doit être installé de manière strictement horizontale, à environ 40 cm sous la surface. **Le transducteur doit être en permanence immergé lors de son utilisation.**



- Initialisation du système

Allumer l'ordinateur.

Lancer le programme « Installation » de RoxAnnGD v1.22.

Laisser la langue anglaise par défaut, valider. Le second écran ne nécessite aucune manipulation.

Attendre que le transducteur et le GPS soient détectés avant de valider la 3ème étape. Si les instruments ne sont pas reconnus, recommencer les branchements et redémarrer l'ordinateur.

Dans la ligne « 200 kHz » de l'étape suivante, sélectionner « Go to calibration »

N'allumer l'échosondeur qu'à partir de cette étape. Réaliser les réglages nécessaires.

- Réglages de l'échosondeur

Fréquence : Single Frequency, 200 kHz (bouton « MODE »)

Profondeur maximale : 80 m (bouton « RANGE »)

Gain : 5 (bouton « GAIN »)

Pour effectuer la pré-calibration électrique, sélectionner « Calibration at Sea » lorsque le fond est situé à 15-25 m de profondeur avec un sol meuble (vase ou sable fin), plan et homogène.

A partir de ce moment, lancer RoxMap32 Scientific. L'enregistrement des données s'effectue dans RoxMap32, en cliquant sur l'icône disquette.

2. Acquisition des données de calibration

- Zone de substrat large pour limiter les erreurs d'identification du substrat. Ces zones peuvent être identifiées lors de l'acquisition des données.
- Ancrer le bateau pour éviter qu'il dérive.
- Eteindre le moteur pour limiter les perturbations acoustiques.
- Commencer les enregistrements acoustiques : ≈ 1 à 2 minutes ($60 \times 2 \text{ min} = 120$ échos).
- Procéder à l'enregistrement vidéo ou à l'échantillonnage à la benne.
- Dans le cas des prélèvements à la benne faire une photo du prélèvement avec une échelle granulométrique ou conserver l'échantillon pour une détermination au laboratoire.
- Remplir la fiche terrain

3. Acquisition des données

- Vitesse la plus constante possible : aux alentours de **3,8 nœuds** soit 7 km.h^{-1} . Eviter au maximum les accélérations et ralentissements.
- Eviter les changements brusques de cap et les virages trop serrés.
- Eviter de faire tanguer le bateau. Le transducteur doit rester le plus horizontal possible.
- La profondeur doit être comprise entre 1,5 et 35-40 mètres.

12. Annexe 2 : Fiche terrain

Cette fiche est à remplir lors des mesures de calibration. Chaque « track » correspond à une mesure de calibration différente.

Numéro fiche (code lac date)		Nom lac	Commune	Date	Nom opérateur	Coordonnées Lac (Long-Lat-WGS84)	Profondeur max. théorique	Numéro profil sonde	Transparence (m)
Numéro track	heure système début d'enregistrement	Waypoint	profondeur (m)	numéro enregistrement caméra	numéro photo échantillon benne	numéro flacon échantillon	Substrat identifié		
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
(...)									
Numéro track	Remarques								
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
(...)									

La transparence est estimée avec un disque de Secchi. Elle est donc exprimée en mètres

13. Annexe 3 : Réglages faciles du script R

- Choix du site miroir du CRAN (Etape 1)

Par défaut, le site miroir choisit est le 0-Cloud mais ceci est modifiable en exécutant la commande « `chooseCRANmirror()` ». Ceci va ouvrir un menu défilant permettant le choix d'un autre site miroir.

- Lors du nettoyage du jeu de données (Etape 2)

Un premier filtre est mis en place en supprimant toutes les lignes présentant une profondeur plus importante que *ecartProfMax*. Cette variable s'exprime en mètres et est demandée à l'opérateur lors de l'étape 0 (phase de dialogue avec l'opérateur).

Un second filtre est utilisé en prenant en compte la pente entre deux points successifs. Pour s'assurer que ces deux points ne sont pas trop éloignés, leur distance est comparée à *distMax*, qui par défaut est fixée à 10 mètres. Si les points sont suffisamment proches, la pente est calculée et comparée à *penteMax*. Lorsque la pente est supérieure à *penteMax* (5 par défaut), le point le plus profond est supprimé. *penteMax* est égal à la différence de profondeur divisé par la distance entre les deux points.

- Maillage de la grille d'interpolation (Etape 3)

Il est possible de définir le maillage de la grille d'interpolation. Un maillage fin permet une plus grande précision mais nécessite un temps de traitement plus important. La taille des cellules dans la grille est définie par *c1* pour la longitude et *c2* pour la latitude. Par défaut, leur taille est fixée à 10^{-5} soit un peu moins d'un mètre.

- Limites de la grille d'interpolation (Etape 3)

Il existe deux manières de modifier les limites de la grille d'interpolation. Par défaut, la grille englobe la totalité du plan d'eau. Il est cependant possible de la limiter à la zone de mesure en enlevant les # devant les deux lignes de script qui définissent ces nouvelles limites. Ces lignes sont à la suite de celle précisant les limites initiales de la grille. Lorsque la grille est ainsi réduite, l'affichage ne permet pas de réduire de manière automatique le fond de carte. Celui-ci est ainsi affiché en dehors de la zone graphique.

Il est également possible de limiter la taille de la grille d'interpolation de manière manuelle en définissant *x0* et *y0*.

- Couleur de la carte de bathymétrie

La couleur choisie est un dégradé allant du cyan au noir. Ces deux couleurs extrêmes peuvent être modifiées en modifiant les variables *couleurProfMin* et *couleurProfMax*. Les nouvelles couleurs doivent être reconnues par R.

- Emplacement des légendes

Les légendes sont placées par défaut sur la droite de la carte. Cependant, cette répartition automatique peut être mal appropriée dans le cas de certains plans d'eau. Il est donc possible de modifier manuellement leurs emplacements.

xLegende donne l'emplacement des légendes sur l'axe des abscisses (toutes les légendes sont alignées)

yLegendeCouleur donne l'emplacement des légendes des couleurs affichées (profondeur, probabilité de présence, substrat) selon l'axe des ordonnées

yLegendeTrajectoire donne l'emplacement de la légende de la trajectoire (et éventuellement des points de calibration) selon l'axe des ordonnées

yLegendeEchelle donne l'emplacement de la légende de l'échelle selon l'axe des ordonnées

- Pourcentage du jeu de calibration attribué au jeu d'apprentissage (Etape 5.1)

Pendant l'étape 2, le jeu de calibration est divisé entre le jeu d'apprentissage et le jeu de calibration. Le pourcentage est actuellement fixé à 0,5, ce qui signifie que les jeux d'apprentissage et de calibration ont la même taille. Des tests ont été réalisés avec des pourcentages allant de 0,25 à 0,75 et ont montré que cela n'affectait pas la validation du modèle. Il est cependant facile de modifier ce pourcentage en changeant la valeur de la variable *pourcentageApp* qui précise le pourcentage attribué au jeu d'apprentissage.

Pour sélectionner manuellement les jeux d'apprentissage et de validation, il est possible de les renseigner directement dans les variables *app* et *val*.

- Nombre de substrats initiaux (Etape 5.2)

Dans ce script, 8 substrats sont initialement définis : végétaux, vase, sable, gravier, pierre, galet, bloc et IND (indéterminé). Si un substrat n'est pas présent dans le lac, il n'est pas nécessaire de le supprimer dans le script car cela n'a pas d'influence sur les résultats finaux. Cependant, il est possible de modifier ces substrats initiaux, soit pour en changer la dénomination soit pour en changer le nombre. Dans ce cas, il faut éventuellement modifier la valeur de *nSub* pour qu'il corresponde au nombre de substrats voulus puis les noms de substrats dans la ligne en-dessous. Attention, il faut que le nombre de noms de substrats soit égal à *nSub* (les colonnes *Lat* et *Long* sont comptées en plus automatiquement). Attention, pour conserver les légendes, il peut être nécessaire de modifier également *tableCoul* à l'étape 5.4. C'est un tableau qui recense les différents substrats et leur attribue une unique couleur. La modification du nombre de substrats peut cependant s'avérer délicate. Il s'agit donc d'une opération à manier avec précaution.

- Couleurs de la carte de probabilité de présence des substrats

Comme pour la carte de bathymétrie, la couleur de la probabilité de présence est un dégradé entre *couleurAbsence* et *couleurPresence*.

- Seuil de probabilité au-delà duquel un substrat est considéré comme présent (Etape 5.3)

Au début de l'étape 5.3, la variable *seuil* est fixée à 0,5. Cela signifie qu'un substrat est considéré comme présent sur la zone lorsque sa probabilité est supérieure ou égale à 50%. Un seuil plus faible limite les substrats indéterminés mais augmente le nombre de substrats considérés comme des mélanges. Ce seuil peut donc être adapté en fonction des objectifs de l'étude.

- Nombre seuil de substrats au-delà duquel il s'agit d'un mélange (Etapas 5.3 et 6.3)

Lorsque plusieurs substrats sont considérés comme étant présents sur la même zone, il est possible de recenser le substrat sous la forme *substrat1_substrat2_...* ou bien le noter « mélange ». Dans le script initial, une zone avec 3 substrats ou plus est considéré comme un mélange mais ce chiffre seuil peut être modifié en changeant la valeur de *seuilMelange*. Cette variable est modifiable indépendamment aux étapes 5.3 et 6.3 et agissent respectivement sur la carte finale de répartition des substrats et sur l'édition des carrés RoxAnn.

14. Annexe 4 : Résolution de quelques problèmes possibles lors de l'exécution du script R

Si le script ne s'exécute pas correctement, le lancer par étape peut aider à déterminer la source du problème.

En règle générale :

- Vérifiez que les packages et les données initiales (bases de données) sont correctement installés et chargés.
- Si un problème a lieu à l'étape x, vérifiez que l'étape x-1 s'est déroulée correctement et a donné des résultats cohérents
- N'hésitez pas à consulter l'aide de R spécifique à une fonction.

Etape 1

- Problème dans l'installation des packages.

L'étape 1 permet l'installation si nécessaire et le chargement des packages utiles. Le site miroir CRAN choisit automatiquement est le 0-Cloud. Vous pouvez le modifier en choisissant manuellement un site miroir CRAN en sélectionnant Packages > Choisir le site miroir de CRAN... ou en exécutant « chooseCRANmirror() ». Ces deux actions vont ouvrir une fenêtre graphique avec la liste des sites miroirs de CRAN disponibles.

Etape 2

- Problème dans la création des tables de travail

Pour la table de mesures et de calibration, il n'y a initialement pas de noms de colonnes. Ceux-ci sont ajoutés dans le script. Cependant, si le nombre ou l'ordre des colonnes a été modifié, le nom attribué ne correspond plus au contenu. Il est donc nécessaire de se conformer au formatage proposé des données, ou bien de modifier l'attribution des noms de colonnes.

Etape 3

- Problème lors de la préparation du fond de carte

Afin de s'assurer de la bonne exécution des différentes étapes de l'importation du fond de carte, il est possible de réaliser la commande « plot(fondCarte) » pour afficher le contenu de la variable *fondCarte* et « plot(lac) » pour afficher uniquement le plan d'eau sélectionné.

Le script a été conçu pour faire face à un certain nombre de cas mais il est possible que le lac étudié n'existe pas dans la base Carthage, ou bien n'a pas été nommé correctement. Dans ce cas, il est possible d'exécuter le script sans le fond carte mais il n'apparaîtra évidemment pas sur les cartes finales. Il est également possible de préparer le fond de carte indépendamment, via un logiciel de SIG par exemple (comme ArcGIS ou QGIS) puis de l'importer directement pour l'importer dans la variable *lac*.

- Problème avec la résolution de la grille d'interpolation et temps de traitement associé

Si le temps d'exécution du script R est trop long, ce peut être dû à la grille d'interpolation. Une grille d'interpolation fine permet une plus grande précision mais nécessite un temps de traitement plus important. La finesse du maillage est définie par *I1* et *I2*. Par défaut, la grille d'interpolation a un maillage de 500 x 500.

Si la zone d'échantillonnage est très petite devant la taille totale du plan d'eau, il peut être intéressant de limiter la taille de la grille d'interpolation. Ceci est faisable en modifiant *x0* et *y0* (Annexe 3 : Réglages faciles du script R).

Etape 4

- Problème d'interpolation des profondeurs, avec la fonction « interp »

Vérifiez que le package « akima » est correctement chargé. Le cas échéant, demandez à R un résumé (fonction `summary()`) de *x*, *y* et *z* pour voir si le problème ne vient pas de là. *x*, *y* et *z* représentent respectivement les valeurs de longitude, latitude et profondeur. Si le problème est autre, l'aide relative à la fonction (via `?interp`) peut être utile.

- Problème lors de l'affichage de la carte des bathymétries

Vérifiez les valeurs de *carteProf\$x*, *carteProf\$y* et *carteProf\$z* qui représentent respectivement les valeurs de longitude, latitude et profondeur interpolée. Cette dernière variable est plus difficile à vérifier

car présentée sous forme de très grand tableau. Il est néanmoins facile de s'assurer que ce tableau n'est pas entièrement composé de NA. Si les valeurs ne sont pas conformes aux valeurs attendues, le problème vient probablement de l'exécution de la fonction « interp ». Si le problème ne vient pas des valeurs, se référer à l'aide concernant la ou les fonction(s) d'affichage qui ne fonctionne(nt) pas.

Etape 5

- Problème lors de l'application du modèle sur le jeu d'apprentissage ou la base de données complète

Pour valider le modèle, le jeu de calibration est séparé en jeu d'apprentissage et jeu de validation. Un message d'erreur peut apparaître si dans le jeu d'apprentissage, il existe des substrats pour lesquels il n'y a qu'un seul échantillon. Dans ce cas, si la base de données est suffisamment importante et que ce n'est qu'un hasard, il suffit de refaire tourner le script qui définira aléatoirement un nouveau jeu d'apprentissage. Si en revanche la base de données de calibration est relativement réduite, il faut soit définir manuellement le jeu de calibration et le jeu de validation soit utiliser un autre modèle que random forest. Pour de petits jeux de données, l'utilisation de la méthode des k-means est appropriée mais elle requiert l'intervention d'un opérateur.

La phase de validation du modèle n'est pas indispensable dans l'exécution du script, à condition que le jeu total de calibration soit suffisamment important. Cependant, cette phase permet de confirmer que le modèle est capable, après apprentissage, de prédire correctement les substrats. Cela permet également d'estimer le taux d'erreur possible lors de la prédiction des substrats.

- Problème lors de la création de la table de présence/absence des substrats.

Le problème peut venir de l'intitulé des substrats dans la base de calibration. Si les noms de substrats ne sont pas conformes au formatage proposé (attention, R est sensible à la casse), le script ne pourra reconnaître les différents substrats et les classera comme indéterminé. La modification des noms de substrats est cependant possible (Annexe 3 : Réglages faciles du script R).

- Problème lors de l'interpolation de la probabilité de présence des sédiments

Les problèmes (et solutions) sont du même type que ceux rencontrés à l'étape 3, lors de la première utilisation de la fonction « interp ».

- Problème rencontré lors de la création des cartes de répartition des substrats

Pour tester si l'affichage des cartes fonctionne, vous pouvez exécuter seulement les lignes après `jpeg(...)` et avant `dev.off()` pour un substrat donné (il suffit pour cela de fixer *sub*, le numéro du substrat).

- Problème rencontré lors de la préparation à l'affichage de la carte de répartition des substrats

Tout comme pour la carte des profondeurs, il est conseillé de tester chaque étape de l'affichage pour définir d'où vient le problème. Il faut ensuite vérifier les arguments de la fonction incriminée, avec la possibilité de recourir à l'aide de R.

Si des problèmes, rencontrés lors de la préparation des couleurs, sont difficiles à résoudre, il est possible d'éviter l'exécution d'une partie de l'étape 5.4 (hormis la création de la variable *subNum*). Dans ce cas, lors de l'affichage, étape 5.5, il suffit de supprimer « `col=couleurSub[,2]` ». Les couleurs ne seront alors plus communes à l'ensemble des cartes.

- Problèmes lors de l'affichage des graphiques 3D

L'affichage ne peut être assuré si la package « rgl » n'a pas été correctement chargé. Cette étape peut prendre un peu de temps.

Etape 6

L'étape 6 ne présente pas de problèmes particuliers ou nouveaux par rapport aux étapes précédentes.

15. Annexe 5 : Description du script R

Le script R se déroule en 6 étapes principales.

- L'étape 0 est décrite dans le paragraphe 5.3 Utilisation du script R
- L'étape 1 permet le chargement des différents packages nécessaires au bon déroulement du script. Si un des package n'est pas déjà installé, cette étape permet de le faire automatiquement en utilisant le site miroir de CRAN 0-Cloud.
- L'étape 2 permet de préparer les données qui seront utilisées par la suite. Les jeux de données sont extraits des tables complètes importées à l'étape 0 puis nettoyés en supprimant les valeurs aberrantes.
- Lors de l'étape 3, le fond de carte est importé et le lac étudié extrait. La grille d'interpolation est également construite.
- L'étape 4 est la construction de la carte des bathymétries. L'interpolation linéaire est effectuée avec la fonction « interp » du package « akima » puis affichée sur une carte. La carte est automatiquement enregistrée aux formats PDF et PN dans le répertoire de travail, ainsi que dans une fenêtre graphique de R.
- L'étape 5 est la construction de la carte des substrats. Ceci étant plus complexe, l'étape 4 est divisée en 5 sous-étapes.
 - L'étape 5.1 consiste en la calibration et la validation du modèle qui permet de prédire les substrats. Le modèle choisit par défaut est un modèle de forêt d'arbres décisionnels. Ce modèle nécessite qu'il y ait au moins deux échantillons de chaque substrat. La validation du modèle se fait en séparant le jeu de calibration en un jeu d'apprentissage et un jeu de validation. La comparaison des prédictions du modèle et des substrats réels dans le jeu de validation donne une estimation de l'efficacité du modèle. Le taux de substrats du jeu de validation correctement classés par le modèle calibré sur le jeu de calibration est ensuite calibré sur l'ensemble du jeu de calibration afin d'être le plus robuste possible. Ce modèle final est alors appliqué à l'ensemble du jeu de mesures (non calibré) et permet d'avoir pour chaque triplet (E1, E2, profondeur) un substrat prédit.
 - L'étape 5.2 consiste à créer des cartes de probabilité de présence de chaque substrat. En effet, les substrats ne peuvent être directement interpolés entre les points de mesure. Ce sont donc ces probabilités de présence qui vont pouvoir être interpolées. Le résultat de cette interpolation est enregistré sous forme de cartes (format jpeg) dans le répertoire de travail.
 - Le regroupement de ces cartes se fait via une règle de décision lors de l'étape 5.3. Si un ou plusieurs substrats sont présents en un point avec une probabilité supérieure à un seuil, ils sont considérés comme effectivement présents. Lorsqu'un nombre trop important de substrats sont présents au même endroit, le substrat est renommé « mélange ».
 - L'étape 5.4 est une préparation des données à l'affichage. Un chiffre est attribué à chaque substrat et relié à une table prédéfinie, ce qui permet d'obtenir des cartes avec toujours le même code couleur.
 - L'étape 5.5 est l'affichage effectif de la carte des substrats. Ces cartes sont affichées dans une fenêtre graphique de R, mais également enregistrées au format PDF et JPEG. Cette étape permet également l'affichage de deux graphiques en 3D. Le premier présente les points de calibrations en fonction de E1, E2 et de la profondeur et permet donc de voir si les points sont séparés dans l'espace ou non. Le deuxième affiche la carte du plan d'eau en trois dimensions. Attention cependant, l'échelle n'est pas la même d'un axe à l'autre.
- L'étape 6 est la construction des carrés RoxAnn. Elle renvoie donc un tableau avec les coordonnées des différentes boîtes ainsi que leur substrat associé. Cette étape est également décomposée en sous-étapes.
 - L'étape 6.1 consiste à englober les points d'un même substrat dans un unique carré.
 - L'étape 6.2 recherche les intersections entre ces carrés. Ce sont des zones où le substrat prédit n'est plus unique mais sous la forme substrat1_substrat2.
 - L'étape 6.3 permet de nettoyer le jeu de données ainsi obtenu. Lorsque trop de substrats sont possibles pour un même couple (E1, E2), le substrat est considéré comme étant un mélange. Les rectangles entièrement couverts par d'autres sont également supprimés. En effet, lors de l'édition des RoxBox dans RoxAnn, les rectangles ne peuvent se superposer.
 - L'étape 6.4 permet de réorganiser les rectangles dans l'ordre dans lequel il faut les rééditer dans RoxAnn. Cet ordre est important puisqu'il peut faire apparaître ou disparaître certaines zones. Cette étape permet également l'enregistrement de la matrice ainsi constituée au format .csv dans le répertoire de travail.

- L'étape 6.5 permet un affichage simultané des carrés RoxAnn® et des points de calibration. En plus de l'affichage dans la fenêtre graphique, les figures sont enregistrées aux formats PDF et JPEG.
- L'étape 7 permet l'édition d'un fichier texte récapitulatif de certaines données d'entrée et de sorties. Celui-ci est décrit au paragraphe 5.4.8 Fichier récapitulatif.

16. Annexe 6 : Choix des modèles utilisés lors de la construction des cartes

Les substrats ne sont connus qu'aux points de calibration. Pour le reste de la zone d'étude, il est nécessaire de les estimer. Lors de la prédiction, deux cas sont possibles : E1, E2 et la profondeur ont été mesurés en ce point ou bien aucune mesure n'a été effectuée. La prédiction sera donc différente pour les points suivant l'échantillonnage et pour les autres points du lac.

- Pour les points mesurés

La prédiction du substrat en ces points s'appuie sur les données de calibration et les résultats des mesures effectuées. Un modèle d'apprentissage automatique, forêt d'arbres décisionnels ou random forest, est appliqué aux données de calibration. Des tests ont été réalisés pour comparer ce modèle à d'autres (classifieur bayésien naïf, méthode des k-means,...) et celui-ci a démontré son efficacité. De plus, il permet une automatisation du processus, ce qui n'est pas le cas pour d'autres méthodes telles que k-means ou CART. Cependant, pour obtenir des résultats concluants, la base de calibration doit présenter au moins deux échantillons pour chaque substrat. Le protocole de calibration du modèle avec un enregistrement fixe des données acoustiques du substrat pendant 1 à 2 minutes permet d'augmenter le nombre d'échantillons par substrat et donc la robustesse du modèle.

La calibration du modèle se fait via la fonction « train » du package « caret » avec pour variables explicatives E1, E2 et la profondeur. Cette fonction renvoie le meilleur modèle de forêt d'arbres décisionnels. Le modèle ainsi construit est alors appliqué au jeu de données de mesures avec la fonction « predict » du même package et confère à chaque point de mesure un substrat prédit.

La validation du modèle par les jeux d'apprentissage et de validation permet d'estimer le taux d'erreur de prédiction. Parmi les lacs étudiés pour la mise en place de ce protocole, ce taux d'erreur était en deçà de 20%, généralement même en deçà de 10% (pour une calibration selon le protocole proposé).

- Pour les points non mesurés

La prédiction du substrat en ces points ne s'appuie que sur les substrats précédemment prédits. Il s'agit donc d'une interpolation. Les substrats étant des variables qualitatives, ils ne peuvent être interpolés directement. Pour contourner ce problème, le script crée des cartes de présence/absence avec les substrats connus (calibration et prédiction par le modèle). Lorsqu'un substrat appartient à une catégorie mixte, il est attribué une présence à chacun des substrats constituant ce mélange. L'interpolation est faite sur ces données, ce qui permet d'obtenir des cartes de probabilité de présence d'un substrat. L'interpolation utilisée est l'interpolation linéaire avec la fonction « interp » du package « akima ». L'interpolation linéaire permet des résultats plus facilement compréhensibles par rapport à certaines autres interpolations plus complexes. Le meilleur moyen pour interpoler serait d'utiliser des méthodes de krigeage. Cependant, ces méthodes nécessitent l'ajustement manuel d'un variogramme, ce qu'il n'est pas possible d'inclure dans un script automatisé.

L'interpolation permet donc d'obtenir, par substrat, une carte de probabilité de présence. La réunion de ces cartes en une seule se fait en suivant une règle de décision. Lorsqu'un substrat a une probabilité supérieure ou égale à un seuil préalablement fixé (par défaut 0,5), il est considéré comme effectivement présent. Si deux substrats sont considérés comme présent en un point, ils forment une classe mixte notée *substrat1_substrat2*. Si trois substrats ou plus (seuil modifiable) sont considérés comme présents, le substrat est considéré comme étant un mélange et noté *mélange*.

17. Remerciements

Je voudrais remercier toute l'équipe de l'UMR CARTEL à l'INRA de Thonon-les-Bains qui m'ont aidé et soutenus pendant ce travail. Je tiens à remercier tout particulièrement Jean Guillard qui m'a initié à l'acoustique et m'a été d'une aide précieuse. Merci aussi à Jean-Christophe Hustache qui m'a épaulé lors des enregistrements et tests sur le terrain.

Je tiens également à remercier les personnes de l'IRSTEA d'Aix-en-Provence qui ont participé à leur projet et apporté une vision extérieure et pertinente.

Organisme	<i>INRA</i>	<i>IRSTEA</i>
Adresse	<i>75 avenue de Corzent 74200 Thonon-les-Bains</i>	<i>3275 Route de Cézanne 13182 Aix-en-Provence</i>
Numéro de téléphone	<i>+33 (0)4 50 26 78 00</i>	<i>+33 (0)4 42 66 99 10</i>
Site web	<i>http://www6.dijon.inra.fr/thonon/</i>	<i>http://www.irstea.fr/linstitut/nos-centres/aix-en-provence</i>