



**HAL**  
open science

## Classification des fonds lacustres par hydroacoustique

Thomas Poulain, Christine Argillier, Jean Guillard

► **To cite this version:**

Thomas Poulain, Christine Argillier, Jean Guillard. Classification des fonds lacustres par hydroacoustique. [Rapport de recherche] irstea. 2010, pp.28. hal-02594637

**HAL Id: hal-02594637**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02594637>**

Submitted on 15 May 2020

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

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



# *Classification des fonds lacustres par hydroacoustique.*

*Rapport Bibliographique.*

*Thomas Poulain - Cemagref (Aix-en-Provence)  
Christine Argillier - Cemagref (Aix-en-Provence)  
Jean Guillard - INRA (Thonon-les-Bains)*

*Juin 2010*

Avec les partenaires :



## Contexte de programmation et de réalisation

---

Ce travail a été réalisé dans le cadre de l'étude des méthodes de caractérisation de l'hydromorphologie lacustre et a fait l'objet d'un partenariat CEMAGREF-INRA pour la partie « Caractérisation des fonds lacustres par hydroacoustique ». Ce document est le rapport bibliographique concernant cette partie.

## Les auteurs

---

Thomas Poulain  
CDD CEMAGREF – Ingénieur d'étude  
thomas.poulain@thonon.inra.fr  
75 Avenue de Corzent - 74200 Thonon-les-Bains

Christine Argillier  
Directeur de recherches, responsable du pôle hydroécologie plans d'eau  
Christine.argillier@cemagref.fr  
CEMAGREF,  
3275 Route de Cézanne, CS 40061 - 13182 AIX EN PROVENCE CEDEX 5

Jean Guillard  
Ingénieur de recherche – Directeur Adjoint UMR CARTELE  
jean.guillard@thonon.inra.fr  
INRA  
75 Avenue de Corzent - 74200 Thonon-les-Bains

## Les correspondants

---

Onema : Jean-Marc Beaudoin, DAST/DCIE  
Jean-marc.baudoine@onema.fr

Référence du document : Poulain T., Argillier C. et Guillard J., Caractérisation des fonds lacustres par hydroacoustique – rapport bibliographique. Programme d'études Onema/Cemagref 2010, 28 pages.

Onema : Yorick Reyjol, DAST  
Yorick.reyjol@onema.fr

<b>Droits d'usage :</b>	accès libre
<b>Couverture géographique :</b>	
<b>Niveau géographique :</b>	National
<b>Niveau de lecture :</b>	Professionnel
<b>Nature de la ressource :</b>	Document bibliographique

**CLASSIFICATION DES FONDS LACUSTRES PAR HYDROACOUSTIQUE.**  
*Rapport bibliographique*  
Thomas Poulain, Christine Argillier, Jean Guillard

## Sommaire

### Résumé

### Abstract

### Synthèse pour l'action opérationnelle

#### 1. Introduction

#### 2. Les fonds des lacs

#### 3. Les bases théoriques de la classification des fonds, océaniques et lacustres, utilisant les échosondeurs mono faisceau

##### 3.1. Interaction de l'onde sonore avec le fond

###### 3.1.1. La réflexion

###### 3.1.2. La diffusion

##### 3.2. Utilisation des deux premiers échos du fond

##### 3.3. Utilisation du premier écho

##### 3.4. Modèles mathématiques

#### 4. Les systèmes commerciaux de classification des fonds utilisant des échosondeurs mono faisceau

##### 4.1. RoxAnn

###### 4.1.1. Matériel et principe

###### 4.1.2. Les études de performances

##### 4.2. QTC View

###### 4.2.1. Matériel et principe

###### 4.2.2. Les études de performances

##### 4.3. Etudes comparatives de QTC View et RoxAnn

#### 4.4. Les logiciels de post traitement permettant de faire de la classification des fonds aquatiques

#### 5. Les autres technologies

##### 5.1. Les sidescan sonars

##### 5.2. Les sondeurs multi faisceaux

#### 6. Conclusion

#### 7. Bibliographie

**CLASSIFICATION DES FONDS LACUSTRES PAR HYDROACOUSTIQUE.**  
*Thomas Poulain, Christine Argillier, Jean Guillard*

## Résumé

Les phénomènes physiques d'interaction des ondes acoustiques avec les fonds des milieux aquatiques permettent de déterminer des caractéristiques propres à la nature des sédiments. Ce document décrit les différentes technologies utilisées qui permettent de faire de la classification des substrats et résume les travaux publiés sur ce sujet. La majeure partie des documents cités concernent des études effectuées en milieu marin mais sont adaptables en milieu lacustre. Trois technologies sont disponibles : les sondeurs mono faisceau, les sondeurs multi faisceaux et les sidescan sonars. L'utilisation des sondeurs mono faisceau reste la méthode la plus simple à mettre en œuvre. Deux fabricants se partagent le marché des systèmes spécialisés dans la classification des substrats à adapter sur des sondeurs mono faisceau.

**Mots clés :** *échosondeur, substrats lacustres, RoxAnn, QTC View.*

**CLASSIFICATION DES FONDS LACUSTRES PAR HYDROACOUSTIQUE.**  
*Thomas Poulain, Christine Argillier, Jean Guillard.*

**Abstract**

The physical phenomena of interaction of the acoustic waves with the bottom of the aquatic environments make it possible to determine characteristics of the sediments' nature. This document describes various technologies employed to classify the substrates and summarizes scientific works on this subject. The major part of the quoted documents relates to studies carried out in marine environment but is adaptable in lake areas. Three main technologies are available: single-beam echo-sounder, multi-beams sounder and sidescan sonar. The use of the single-beam echo-sounder remains the simplest method to implement. Two manufacturers share the market of the specialized systems of the classification of the substrates, using single-beam echo-sounders.

**Key words** : echo sounder, lake substrate, RoxAnn, QTC View.

**CLASSIFICATION DES FONDS LACUSTRES PAR HYDROACOUSTIQUE.**  
*Thomas Poulain, Christine Argillier, Jean Guillard.*

## Synthèse pour l'action opérationnelle

La Directive Cadre sur l'Eau (2000/60/EC)<sup>1</sup> exige le maintien ou l'atteinte du « bon état » écologique des plans d'eau qui comprend une composante hydromorphologique soutenant la biologie. Parmi les critères morphologiques figurent la qualité et la quantité du substrat. En milieux lacustres, souvent profonds et à faible transparence, une observation directe de ces substrats (*in situ* par plongée ou par prélèvement à la benne) est très lourde à mettre en place et/ou techniquement compliquée. Ainsi, la possibilité d'utiliser l'acoustique pour caractériser les substrats des lacs a été envisagée. Ce rapport bibliographique permet d'avoir une vision globale des différents outils acoustiques qui permettent de caractériser les substrats aquatiques.

Les systèmes utilisant des échosondeurs mono faisceau semblent les plus adaptés à la caractérisation des fonds lacustres de par leur simplicité de mise en œuvre. Ils peuvent être facilement installés sur de petites embarcations. Le point négatif de ces systèmes est leur faible résolution spatiale ce qui implique de trouver un compromis entre qualité de l'échantillonnage et interpolation des résultats. Les deux systèmes existants sur le marché ont fait l'objet de nombreux travaux surtout en zone marine mais adaptables en milieu lacustre. On peut noter que le fabricant Quester Tangent vient de sortir une version de son QTC View (série V) spécialement adapté aux milieux peu profonds, il permet de réaliser des acquisitions à partir d'un mètre de profondeur (alors que les autres systèmes ne sont opérationnels qu'à partir de 5 mètres).

D'autres technologies acoustiques basées sur le traitement d'images permettent de déterminer la nature des fonds aquatiques. Les sidescan sonars et les sondeurs multi faisceaux possèdent un rayon d'échantillonnage spatial très intéressant (pouvant s'étendre jusqu'à 150 mètres de chaque côté de l'embarcation) ce qui permet de limiter les interpolations, en revanche les résultats obtenus sur la qualité du substrat sont moins pointus qu'avec les systèmes mono faisceau. Un autre point négatif de l'applicabilité des sidescan sonars en zones lacustres est son mode opératoire. Le sonar est tracté à l'arrière du bateau et cela peut poser des problèmes pour la navigation sur les petits plans d'eau.

L'hydroacoustique est donc une solution adaptée à la détermination des natures de substrats subaquatiques et offre de nombreux avantages par rapport aux méthodes traditionnelles telle que le prélèvement *in situ* du substrat par benne à sédiment qui ne permet un échantillonnage que très ponctuel et qui s'avère inefficace sur surface dure.

<sup>1</sup> [http://europa.eu/legislation\\_summaries/agriculture/environment/128002b\\_fr.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/agriculture/environment/128002b_fr.htm)

Tableau de synthèse des systèmes permettant la caractérisation des substrats aquatiques :

Systèmes		Avantages	Inconvénients	Publications	
Hydroacoustiques	Mono faisceau	RoxAnn - QTC View Série IV Logiciels Sonar5 -VBT à partir de données sondeur	-prix -mise en œuvre -capacité de détecter un large panel de substrats	-inefficace en zone peu profonde (<5 m) - faible couverture angulaire -vitesse limite -problème en zone trop pentue	Chevillon, 2000 Hamilton, 2001 Collins and Lacroix, 1997 Collins and Galloway, 1998 Hamilton <i>et al.</i> 1999 Self <i>et al.</i> , 2001 Anderson <i>et al.</i> , 2002 Freitas <i>et al.</i> , 2003 a,b, 2005, 2006
		QTC View Série V	- prix - mise en œuvre -capacité de détecter un large panel de substrats <b>-opérationnel en zone très peu profonde (à partir d'un mètre)</b>	-faible couverture angulaire -vitesse limite -problème en zone trop pentue	Riegl <i>et al.</i> , 2005 a,b Hutin <i>et al.</i> , 2005 Freitas <i>et al.</i> , 2008
		Multi faisceaux	-grande couverture angulaire - capacité de détecter un large panel de substrat -bathymétrie à haute résolution	-coût	Brown <i>et al.</i> , 2010 Hamilton, 2005
		Sidescan sonar	-grande couverture angulaire -ne permet pas de faire de la bathymétrie précise	-coût -difficile à mettre en œuvre -moins pointu dans la détermination des substrats	Barnhardt et Kelley, 1998 Brown <i>et al.</i> , 2002 Hamilton, 2005
traditionnels	Benne à sédiment		-certitude sur la nature du substrat prélevé	-nécessite une extrapolation importante liée à la ponctualité de l'échantillonnage -limité par la dureté du substrat et par la longueur du câble	
	Caméra vidéo		-permet de valider les substrats qui ne sont pas pris en compte par la benne à sédiment	-nécessite une extrapolation importante liée à la ponctualité de l'échantillonnage - profondeur maximale limitée par la longueur du câble	

**CLASSIFICATION DES FONDS LACUSTRES PAR HYDROACOUSTIQUE.**  
*Thomas Poulain, Christine Argillier, Jean Guillard.*

## 1. Introduction

L'origine de la télédétection est à mettre en relation avec le besoin de connaissances sur notre environnement et en particulier avec la volonté d'observer et d'étudier les milieux inaccessibles tels que l'espace où les fonds marins. Il existe deux types de système : les systèmes dits passifs qui ne font qu'observer et les systèmes dits actifs qui émettent un signal qui va interagir avec l'objet à étudier. Dans ce dernier cas, le système émetteur bascule ensuite en mode écoute pour analyser les informations retransmises par le corps excité. Dans l'air ou le vide, les systèmes de télédétection qui utilisent les ondes électromagnétiques dominent, mais dans le milieu aquatique, ces ondes sont absorbées très rapidement et deviennent presque inutilisables. En revanche, la densité de l'eau permet à une onde acoustique de se propager beaucoup plus vite que dans l'air mais aussi beaucoup plus loin. Ce sont donc les ondes acoustiques qui servent de moyen de transmission des informations dans les milieux aquatiques.

Depuis 1912 et l'obtention par Richardson du premier brevet d'un sonar permettant de faire de la bathymétrie, les technologies du sonar ont constamment évoluées. McKinney et Anderson (1964) ont été les premiers à réaliser des travaux sur la réverbération du son par les sédiments. Ces travaux ont fait émerger l'idée que les méthodes acoustiques pouvaient permettre d'obtenir des informations sur la nature des fonds. Elles permettent aujourd'hui de caractériser les fonds océaniques et lacustres.

La Directive Cadre sur l'Eau (2000/60/EC) exige le maintien ou l'atteinte du « bon état » écologique des plans d'eau qui comprend une composante hydromorphologique soutenant la biologie. Parmi les critères morphologiques figurent la qualité et la quantité du substrat. En milieux lacustres, souvent profonds et à faible transparence, une observation directe de ces substrats (*in situ* par plongée ou par prélèvement à la benne) est très lourde à mettre en place et/ou techniquement compliquée. Ainsi, la possibilité d'utiliser l'acoustique pour caractériser les substrats des lacs a été envisagée. Ce rapport bibliographique présente dans un premier temps les principes de base de l'interaction d'une onde acoustique avec un substrat, puis les systèmes actuels dédiés à la classification des fonds des milieux aquatiques.

## 2. Les fonds des lacs.

Il existe un très grand nombre de types de lac, de part leur morphologie ou leur hydrodynamique. D'après Pourriot et Meybeck (1995) il existe une grande variation de taille des lacs, du plus grand, la mer caspienne ( $374.10^3 \text{ km}^2$ ) aux plus petits, d'une superficie supérieure ou égale à 1 ha et/ou à un volume de  $10.10^3 \text{ m}^3$ . Les lacs sont en général caractérisés par l'importance de leurs zones littorales et par la forme de leur cuvette. On peut distinguer par exemple des cuvettes convexes, linéaires ou concaves (Pourriot et Meybeck, 1995) ; L'importance de la zone littorale telle qu'elle est définie dans la typologie des plans d'eau nationaux permet d'identifier trois types de milieux (circulaire 2005).

C'est dans les zones littorales que l'on trouve la plus grande diversité de substrat car ces zones sont influencées directement par la nature des berges et son érosion. Ce substrat est divisé en classes de tailles<sup>2</sup> : argile ( $\emptyset < 2 \mu\text{m}$ ), limon (2-20  $\mu\text{m}$ ), sable (20  $\mu\text{m}$  – 2mm), graviers (2mm – 2cm), galets (2-20 cm) et blocs ( $\emptyset > 20\text{cm}$ ). La cuvette est le lieu de sédimentation des particules fines apportées par les affluents et par l'érosion des berges. Ces précipitations de particules forment alors une couche de vase dont la taille des grains est comprise entre 1 et  $10^3 \mu\text{m}$ . L'hydrodynamisme particulier d'un lac peut amener à trouver d'autres natures de fonds dans la cuvette. Par exemple, un rétrécissement de la largeur d'un bassin entraîne une augmentation de la vitesse du courant qui peut empêcher la sédimentation. A ces endroits, on peut donc retrouver les natures de substrats décrits précédemment. Les algues et les débris biologiques contribuent également à la constitution des fonds.

## 3. Les bases théoriques de la classification des fonds océaniques et lacustres avec les échosondeurs mono faisceau.

### 3.1. Interaction de l'onde sonore avec le fond.

L'interaction d'une onde acoustique avec une surface prend deux formes : la réflexion et la diffusion

#### 3.1.1. La réflexion.

La base de la réflexion d'une onde sonore avec le fond est décrite par Orłowski (1984). Si une onde acoustique se propage dans un milieu (ici l'eau) possédant une impédance acoustique  $z_1$  et qu'elle rencontre un milieu d'impédance acoustique différente  $z_2$  (ici le fond), toute l'énergie de l'onde n'est pas transmise à ce nouveau milieu. Une partie de l'énergie est réfléchie au niveau de l'interface. L'impédance acoustique d'un milieu est défini par :  $z_x = \rho_x \cdot c_x$  où  $\rho_x$  est la masse volumique du milieu x et  $c_x$  est la vitesse du son dans ce milieu x.

De ceci, on peut définir un coefficient de réflexion en amplitude de la pression sonore : r.

$$(1) \quad r = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}$$

---

<sup>2</sup> norme NF P18-560

Le coefficient de réflexion  $R$  qui exprime la quantité d'énergie contenue dans l'onde réfléchie est défini par:

$$(2) R = r^2 = \left( \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} \right)^2$$

$R$  est souvent exprimé en décibel :

$$(3) R_{dB} = 10 \log_{10}(R)$$

Si les milieux ont la même impédance, le coefficient de réflexion est nul ( $R=0$ ).  $R$  doit être égal à un pour avoir une réflexion totale. Par abus de langage, on utilise le terme « mou » pour un substrat qui renverra une faible partie de l'énergie incidente alors que le terme « dur » sera employé pour qualifier un fond renvoyant une grande partie de l'énergie incidente (Fig. 1).

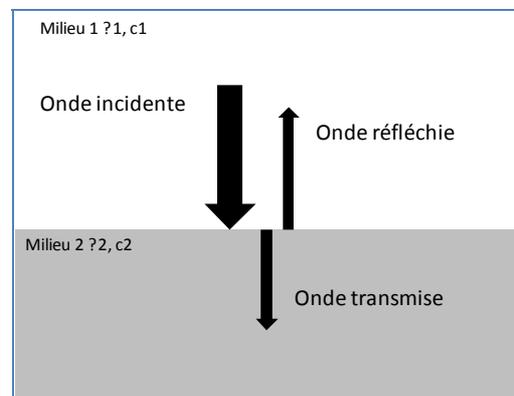


Figure 1 : interaction d'une onde plane à l'interface de deux milieux.

En analysant l'onde réfléchi, on pourrait donc déduire l'impédance acoustique du substrat et donc une partie de ses propriétés mais la réflexion n'est pas la seule transformation que subit l'onde incidente.

### 3.1.2. La diffusion.

La diffusion va dépendre de la nature du substrat et de ses propriétés physiques, en particulier de sa rugosité. La rugosité est la caractérisation des perturbations géométriques d'une surface, c'est à dire la présence ou l'absence de creux sur celle-ci. Lorsqu'il n'y a pas de creux, on parle de surface lisse. La rugosité d'une surface peut être définie par la profondeur moyenne de ces creux (Fig. 2), mais cette caractéristique dépend de l'ordre de grandeur avec lequel on étudie la surface.



Figure 2 : différence entre deux types de surface.

En acoustique, les irrégularités d'une surface ne sont perceptibles que si elles sont de l'ordre de grandeur des longueurs d'ondes. Par exemple, si l'on utilise une fréquence de 100 kHz, la longueur d'onde est de 14.5 mm. Les irrégularités perceptibles d'une surface sont donc de l'ordre de grandeur du centimètre.

Lorsque les ondes acoustiques rencontrent des surfaces ayant une rugosité non nulle, il y a un phénomène de diffusion (Fig. 3) qui entraîne une perte d'énergie de l'onde réfléchie (par rapport à l'onde réfléchie par une surface plane).

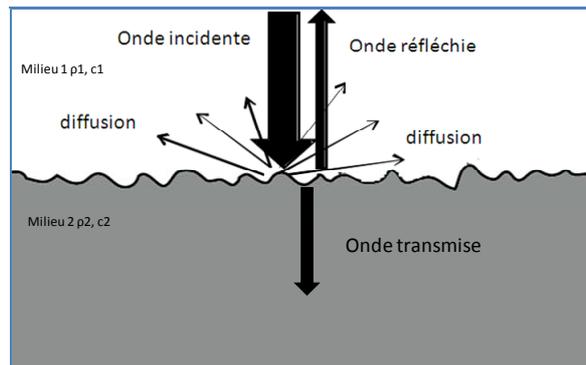


Figure 3 : schéma représentant le phénomène de diffusion.

On note  $r_c$  le coefficient de réflexion d'une onde acoustique sur une surface rugueuse :

$$(4) \quad r_c = r_e^{-2-k^2\sigma^2} \quad (\text{pour un angle d'incidence nul})$$

Avec :

$k$  : nombre d'onde.  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  où  $\lambda = \frac{c}{f}$ . ( $\lambda$  : longueur d'onde,  $c$  : célérité de l'onde dans l'eau et  $f$  : fréquence de l'onde)

$\sigma$  : écart-type du relief.

Comme précédemment on se sert de  $R_c = r_c^2$  lorsque l'on travaille avec des énergies.

### 3.2. Utilisation des deux premiers échos du fond.

Le second écho provient d'une seconde réflexion de l'onde acoustique sur le fond rendue possible par l'intermédiaire d'une réflexion sur l'interface eau-atmosphère (Fig. 5).

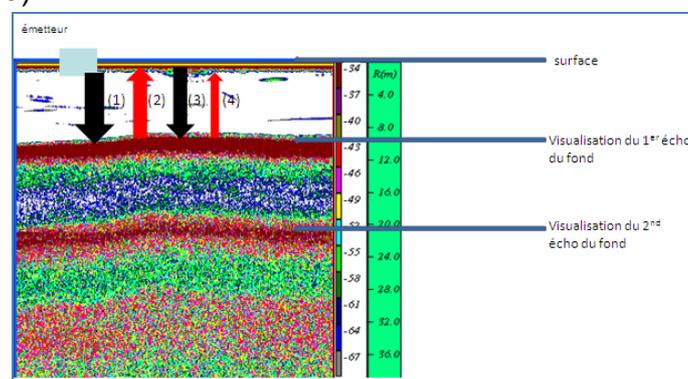


Figure 5 : Exemple d'échogramme permettant de visualiser les deux premiers échos du fond : en (1) une onde est émise, cette onde est réfléchie par le fond (2) ; puis est renvoyée à nouveau par l'interface air-eau (3). Une nouvelle onde de réflexion du fond est ainsi générée (4) provoquant le second écho du fond.

En reprenant l'équation (1), on peut vérifier que l'on peut utiliser couramment le second écho en milieu lacustre : en effet, pour pouvoir se servir du second écho, il faut vérifier que celui-ci n'a subi aucune perte à l'interface eau-atmosphère. On peut calculer la valeur de R avec :

Eau douce :  $\rho_1 = 1\,000 \text{ kg.m}^{-3}$  et  $c_1 = 1\,450 \text{ m.s}^{-1}$ .

Air :  $\rho_2 = 1 \text{ kg.m}^{-3}$  et  $c_2 = 339 \text{ m.s}^{-1}$ .

On a  $R = 0.999$ . La réflexion est donc quasi totale, on peut affirmer que les pertes dues à la réflexion de l'onde acoustique sur cette interface sont négligeables.

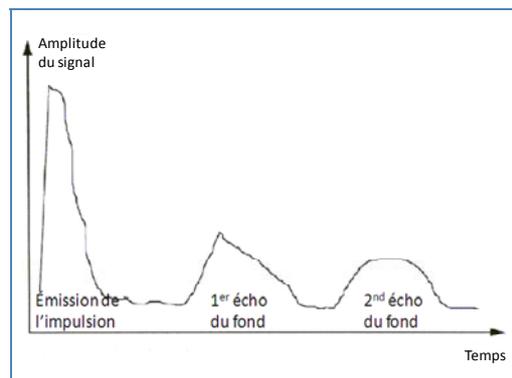


Figure 6 : visualisation du signal temporel enregistré par un échosondeur.

Au début des années 1980, Orłowski (1984) se sert des deux premiers échos du fond pour classer les fonds océaniques (Fig. 6). Il est à l'origine du premier système commercialisé permettant de faire de la classification des fonds : RoxAnn<sup>3</sup> et il a ouvert la voie vers le développement de ces méthodes employant les échos multiples. Le principe de base de la méthode proposée par Orłowski (1984) est de calculer le rapport des racines carrées des énergies du premier et du second écho qui est directement proportionnel au coefficient de réflexion du fond. Il a appliqué cette méthode à plusieurs séries de données issues de différentes campagnes d'échantillonnages acoustiques réalisées entre 1973 et 1980. Des cartes ont ainsi pu être réalisées comme par exemple celle de l'Agulhas Bank (zone côtière de l'Afrique du Sud) où quatre types de fonds ont pu être différenciés : boue, sable+boue, sable, graviers+pierres (Orłowski, 1984).

### 3.3. Utilisation du premier écho.

La classification peut également s'effectuer en utilisant seulement des paramètres propres au premier écho. Cette méthode a été mise au point par Lurton et Pouliquen (1992) ; elle est reprise par Burczynski (1995) qui décrit deux méthodes utilisant le premier écho du fond. Dans notre document, seule la méthode de normalisation du premier écho, la plus courante, est décrite.

<sup>3</sup> [www.sonavision.co.uk](http://www.sonavision.co.uk)

En traçant l'énergie cumulée du premier écho, la méthode « Normalisation du premier écho » permet de faire la différence entre des fonds « durs » et « mous » (Fig. 7).

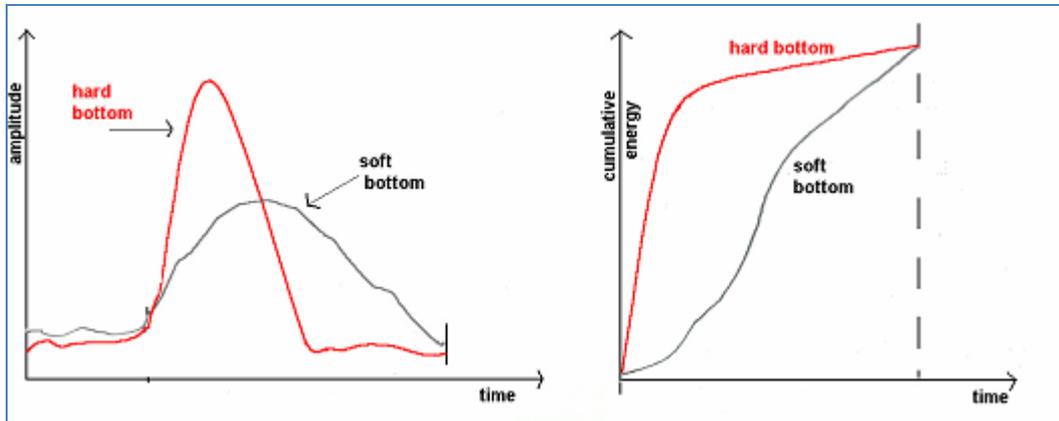


Figure 7 : différences de forme des amplitudes et des énergies cumulées entre deux signaux. Extrait de [www.biosonicsinc.com](http://www.biosonicsinc.com).

Opérationnellement, on compare les formes des énergies cumulées de signaux provenant de fonds de natures connues aux signaux de retour obtenus sur des surfaces à déterminer.

Les deux méthodes décrites précédemment sont utilisées par deux systèmes qui permettent de faire de la classification des fonds des milieux aquatiques. Des études comparatives de ces deux systèmes sont détaillées dans la suite du document (paragraphe 4.3.).

### 3.4. Modèles mathématiques.

Lurton et Pouliquen (1994) ont aussi développé une méthode de caractérisation des fonds océaniques par modélisation mathématique de la forme des enveloppes des signaux temporels renvoyés par le fond. Les enveloppes sont décrites comme la somme des contributions de l'interface eau-fond et des inhomogénéités présentes dans le volume du sédiment (dans les quelques centimètres de profondeur que pénètre l'onde). Le modèle mathématique prend en compte les caractéristiques physiques des fonds observés et les performances de l'échosondeur utilisé. Ils ont montré qu'une identification du fond par comparaison entre l'enveloppe temporelle du signal réverbéré et les courbes obtenues par ce modèle était possible. Cependant, les méthodes utilisant les modèles mathématiques sont rarement utilisées car elles nécessitent l'utilisation d'un sondeur parfaitement calibré et de lourds calculs.

#### 4. Les systèmes commerciaux de classification des fonds utilisant des échosondeurs mono faisceau.

Il est important de noter que ces approches et donc les systèmes commercialisés, nécessitent une calibration *in situ* des réponses acoustiques pour pouvoir faire correspondre les différents types de substrats aux signaux acoustiques.

##### 4.1. RoxAnn

##### 4.1.1. Matériel et principe

Le système RoxAnn (Fig. 8) basé sur les travaux d'Orlowski est composé du boîtier classificateur RoxAnn, d'un GPS, d'un échosondeur et de son transducteur, le tout étant connecté à un ordinateur sur lequel est installé le logiciel RoxMap d'acquisition, de traitement et de représentation des données.

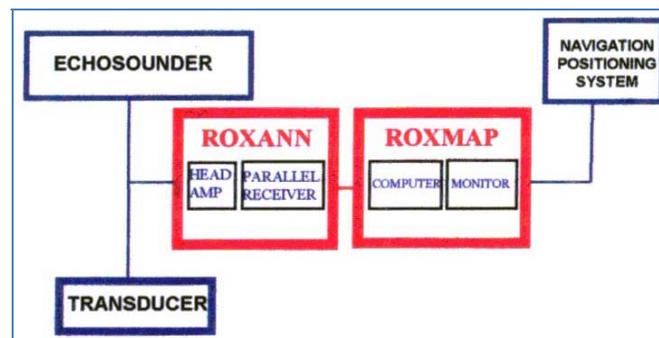


Figure 8 : éléments et connexions du système RoxAnn (Chevillon, 2000).

Toute la partie traitement du signal (amplification, filtrage...) s'effectue dans le boîtier RoxAnn. A partir des analyses des premier et second échos, le système peut déterminer la nature du sédiment sur lequel l'onde s'est réfléchi. Le système envoie une impulsion acoustique puis enregistre le signal temporel retourné (Fig. 9). Les deux premiers échos du fond sont repérés, puis deux valeurs d'énergie sont calculées : E1 et E2. E1 correspond à l'énergie de la seconde partie du premier écho (commence après la durée d'une impulsion et dure deux fois ce temps) et E2 est l'énergie totale du second écho (Fig. 9). E1 est une traduction de la rugosité du fond alors que E2 caractérise sa dureté. En effet, l'énergie de la seconde partie du 1<sup>er</sup> écho permet de quantifier l'énergie diffusée par la surface insonorisée. Le calcul de l'énergie totale du second écho permet de quantifier l'énergie perdue lors des deux réflexions sur le fond et traduit donc la dureté.

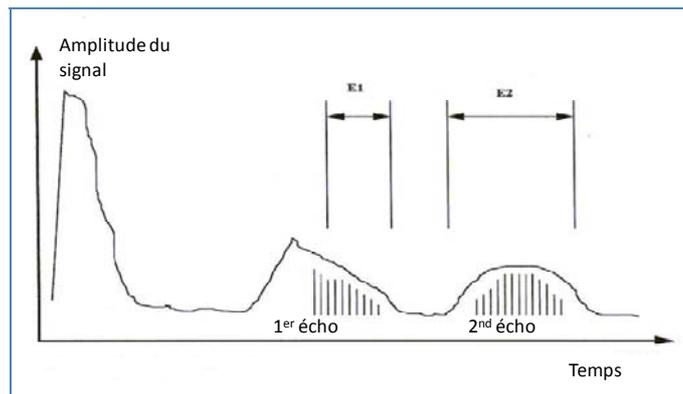


Figure 9 : échos reçus et intégrés pour le calcul de  $E1$  et  $E2$ . (Chevillon, 2000)

Chaque type de fond va produire des couples de valeurs ( $E1$ ,  $E2$ ) bien déterminés. Ces couples sont représentés dans un diagramme bi varié (« RoxAnn Square », Fig. 10), avec  $E2$  en abscisse et  $E1$  en ordonnée, sous la forme d'un point qui se déplace en temps réel sur l'écran au fur et à mesure des déplacements du navire.

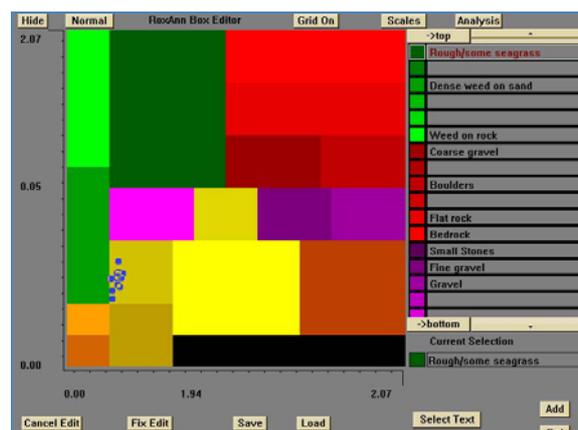


Figure 10 : le carré RoxAnn avec la classification fournie par le constructeur. La grappe de points matérialise les couples de valeurs  $E1/E2$  en cours d'acquisition (Chevillon, 2000).

Le diagramme contient un ensemble de parallélépipèdes (« RoxAnn box ») prédéfinies qui représentent les groupements de valeurs correspondant à une unité sédimentaire donnée. A chaque boîte est attribuée une couleur et un nom correspondant à la granulométrie du fond ou à une couverture biologique particulière (coquilles de crustacés, végétation subaquatique...). Outre l'affichage du carré RoxAnn et du déplacement des couples de valeurs ( $E1$ ,  $E2$ ) dans le carré, la partie logicielle RoxMap permet l'affichage d'un profil bathymétrique et du tracé de la route du navire avec les variations de couleurs correspondant aux types de fonds analysés.

Le constructeur fourni donc un système « prêt à l'emploi » mais une calibration avec son propre échosondeur est fortement conseillée.

#### 4.1.2. Les études de performances

Plusieurs études ont été réalisées avec cet appareil pour analyser ses performances.

Voulgaris et Colins (1990 et 1993) ont montré que la présence de relief impliquait des ambiguïtés sur la caractérisation des fonds. Lors de leurs campagnes, les fonds de sable ridés ont été confondus avec des fonds composés de roches.

Une étude effectuée dans le lac Supérieur par Cholweck *et al.* (2000) a mis en évidence qu'il pouvait y avoir des différences de réponse pour un même type de substrat situé à des profondeurs différentes (contrairement à ce qui est spécifié par le constructeur), notamment en terme de caractérisation de la rugosité. En effet, la surface insonorisée est beaucoup plus petite à faible profondeur qu'en grand fond. Toujours en 2000, une équipe de l'IRD (Chevillon, 2000) a montré que des variations de granulométrie d'un même type de substrat peuvent être détectées acoustiquement. Cinq types (du point de vue granulométrique) de sable ont été identifiés (sable très fin, sable fin, sable moyen, sable grossier et sable très grossier).

Hearn *et al.* ont trouvé une variabilité conséquente des valeurs de E1 et E2 pour des mêmes types de substrats. Ils ont attribué ces artéfacts à des différences d'épaisseur de couche de sable et de boue mais n'ont pas pu le prouver.

Hamilton (2001) affirme que le système RoxAnn permet d'effectuer une classification utile si les restrictions sur la vitesse du bateau sont respectées et si le fond est relativement plat.

#### 4.2. QTC View.

##### 4.2.1. Matériel et principe

La configuration générale du système (Fig. 11) est similaire à celle du système RoxAnn. Le boîtier de QTC View récupère le signal de retour brut, mais la méthode d'analyse diffère. Il ne se sert que du premier écho, celui-ci est converti en signal numérique et est analysé par plusieurs algorithmes qui caractérisent sa forme.

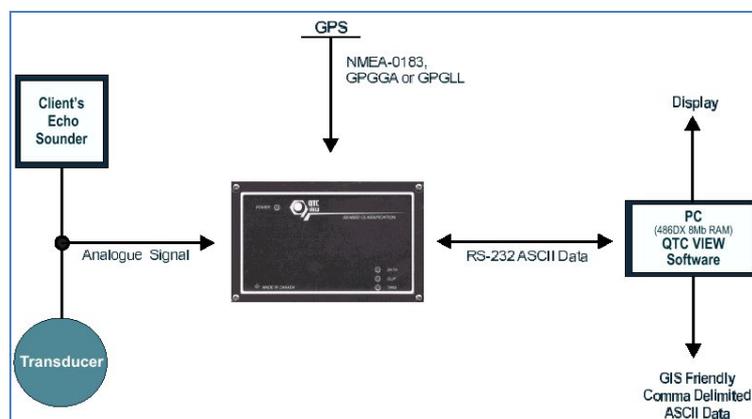


Figure 11 : configuration du système QTC View (Penrose *et al.*, 2005).

A partir de 166 critères de forme, trois paramètres sont extraits et notés  $Q_1$ ,  $Q_2$  et  $Q_3$  (Fig. 12). Ces paramètres sont visualisés dans un espace tridimensionnel nommé « *Q Space* ».

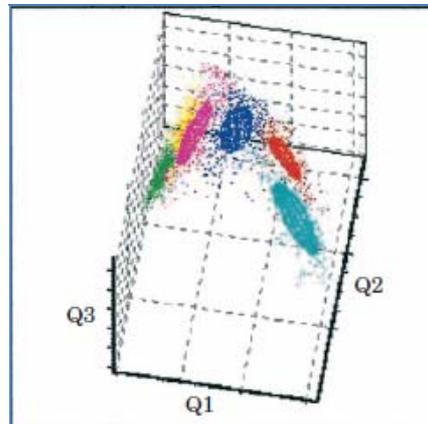


Figure 12 : représentation des trois paramètres  $Q_1$ ,  $Q_2$  et  $Q_3$  (d'après Ellingsen, 2002).

Une fois la classification effectuée, comme avec RoxAnn, un logiciel permet de réaliser une carte de la nature des fonds.

#### 4.2.2. Les études de performances.

Plusieurs études utilisant le système QTC série IV ont testé sa capacité à distinguer différents types de fond. Ces travaux ont montré que les réponses acoustiques dépendent de la rugosité de la surface, de la dureté du substrat, de la taille des grains, de la présence ou de l'absence de débris de coquilles et de la porosité du sédiment, tout cela indépendamment de la profondeur (Collins and Lacroix (1997); Collins and Galloway (1998); Hamilton *et al.* (1999); Self *et al.* (2001); Anderson *et al.* (2002); Ellingsen *et al.* (2002); Freitas *et al.* (2003 a,b, 2005, 2006)).

Von Szalay et McConnaughey (2000) ont mis en avant certaines contraintes d'utilisation. En effet, selon leurs résultats, la vitesse du bateau ne doit pas excéder 12 nœuds et la pente du fond ne doit pas être supérieure à  $8^\circ$  pour que les résultats soient significatifs. En 2005, Waples *et al.* ont utilisé le QTC View pour caractériser le fond d'une partie du lac Michigan où quatre substrats ont pu être identifiés : roche, galets plus sable, principalement sable et argile.

Le constructeur précise que ce système ne fonctionne que pour des profondeurs supérieures à 10 mètres. Ainsi, pour répondre à une demande croissante d'études de zones à faibles profondeurs, la compagnie Quester Tangent a mis au point le QTC View série V (QTC VIEW Series V User Manual, 2004) permettant de travailler dans des zones très peu profondes (à partir d'un mètre). Le principal changement consiste à avoir un échantillonnage électronique de l'écho beaucoup plus rapide, ce qui permet d'obtenir une bonne représentation des échos peu étalés dans le temps (c'est le cas pour des échos provenant de fonds peu profonds). Quelques travaux ont été réalisés avec ce nouvel équipement :

Riegl *et al.* (2005 a,b), dans le Indian River Lagoon (Floride, USA), ont mis en évidence que le QTV View série V était capable de différencier les types de sédiments mais également de détecter des herbiers aquatiques. Hutin *et al.* (2005) ont utilisé ce système pour tenter de détecter un lit de coquille St-Jacques dans l'estuaire du St-Laurent (Québec, Canada) mais ont échoué (contrairement à Smith *et al.* qui en 2001 ont pu mettre en évidence des fonds recouverts d'huitres). Ils en ont conclu que ce type de matériel n'était pas adapté à la mise en évidence de couches biologiques.

Freitas *et al.* (2008) ont réalisé deux études successives de la même zone en utilisant le QTC View série V mais à deux fréquences différentes : 50 kHz et 200 kHz. Ces campagnes ont été réalisées dans la baie de Cadix où la profondeur est souvent inférieure à cinq mètres. Les deux études ont amené à former trois classes acoustiques de substrat. Grâce au « ground truth » (validation *in situ*), les natures de fond suivantes ont été affectées aux différentes classes acoustiques : sable grossier, sable fin et limon. Cependant, seule la répartition spatiale des classes acoustiques obtenue à 50 kHz correspondait avec celle obtenue par le « ground truth ». A 200 kHz, des problèmes de confusion entre sable et boue sont apparus. Ces résultats sont en adéquation avec des résultats obtenus par Collins and Rhynas (1998) qui ont déterminé une fréquence seuil d'utilisation pour la caractérisation des fonds : 100 kHz. Au delà de cette fréquence, trop d'énergie est atténuée dans la colonne d'eau pour que la méthode soit efficace.

### **4.3. Etudes comparatives de QTC View et RoxAnn.**

Hamilton et ses collaborateurs ont réalisés de nombreux travaux sur la classification des fonds marins et notamment des études comparatives des deux systèmes. Dans un article paru en 1999, ils montrent que les classes générées par QTC View sont bien structurées et suivent les variations de taille de grain alors que RoxAnn fournit des limites de classe mal définies (Hamilton *et al.*, 1999). Ils mettent en cause le fait que la représentation de classes granulométriques par des rectangles n'est pas optimale. Ils remarquent également une dépendance des résultats à la vitesse du bateau pour RoxAnn alors qu'il n'y en a apparemment pas avec QTC View. De plus, les deux systèmes montraient des défaillances sur des terrains rocailloux. Dans la discussion de cet article, à la question « Est-ce que l'un des systèmes RoxAnn ou QTC View est meilleur que l'autre ? », Hamilton *et al.* répondent que cela dépend des connaissances et de l'expérience de l'utilisateur et également de l'usage que l'on veut en faire. La qualité de la classification serait peut être meilleure avec le système QTC View qu'avec RoxAnn. En revanche, ce dernier serait beaucoup plus simple d'utilisation. L'espace de classification de RoxAnn est continue alors que l'utilisation des facteurs Q par QTC View peut amener à oublier des types de fond ou à mal les interpréter.

Une autre étude comparative réalisée en vue de caractériser des fonds recouvert d'huitres n'a pas montré de différence significative entre QTC View et RoxAnn, les deux systèmes étant satisfaisants (Smith *et al.*, 2001).

Il est important de noter que ces systèmes nécessitent une phase de validation *in situ* des natures de substrats, appelée « ground truth ». Les premières études réalisées avec un nouveau système et/ou un nouveau transducteur (ou sondeur) (ces systèmes étant sondeur dépendant) sont plus lourdes en manipulation que lorsque le système est établi.

#### **4.4. Les logiciels de post traitement permettant de faire de la classification des fonds aquatiques.**

Biosonics commercialise un logiciel de post traitement de données issues d'échosondeurs mono faisceau, le Visual Bottom Typer<sup>4</sup> (VBT). Ce logiciel permet de choisir la méthode de classification que l'on veut utiliser. Il réalise les calculs des paramètres nécessaires (énergies des deux premiers échos du fond ou paramètre de forme du premier écho selon la méthode choisie) à la détermination des types de fond, effectue les analyses statistiques et permet également de faire la représentation géographique des résultats, c'est à dire des cartes représentant les natures des fonds sondés.

Sonar5-pro<sup>5</sup> est un logiciel permettant de faire des calculs de biomasses et de distribution de tailles des populations et dans lequel un module de calcul d'énergies relatives aux deux premiers échos du fond vient d'être implémenté. Ce module doit permettre d'appliquer la méthode utilisée par RoxAnn. Cependant toute la partie traitement de données reste à mettre en place, c'est à dire l'analyse statistique qui permet de former les groupes de réponses acoustiques mais également la représentation cartographique. Nous avons réalisé des travaux de détermination du substrat en lac à partir de la combinaison échosondeur SIMRAD EK60 (70 kHz) et post-traitement des données par Sonar5-pro. Une synthèse de ces travaux sera fournie dans le courant de l'année 2010.

### **5. Les autres technologies.**

Il existe d'autres technologies (basées sur le traitement d'images), permettant de faire de la classification des fonds marins ou lacustres, qui fournissent non plus des informations ponctuelles (sous le navire) mais des informations sur toute une bande perpendiculaire au déplacement du bateau. Ce sont les sidescan sonars et les sonars multi faisceaux.

#### **5.1. Les sidescan sonars.**

Les sidescan sonars sont constitués de deux transducteurs montés chacun sur un coté du navire ou plus communément sur un engin tracté (Fig. 13).

<sup>4</sup> [www.biosonicsinc.com/echosounder-products/dtx\\_series\\_bottom\\_classification.html](http://www.biosonicsinc.com/echosounder-products/dtx_series_bottom_classification.html)

<sup>5</sup> [www.fys.uio.no/~hbalk/sonar4\\_5/index.htm](http://www.fys.uio.no/~hbalk/sonar4_5/index.htm)



Figure 13 : exemple de système tracté par un navire comprenant les deux transducteurs (Hamilton, 2005).

Chaque transducteur produit un faisceau vertical qui suit une ligne fine perpendiculaire au déplacement du navire (Fig. 14). La limite du faisceau est donnée par la fréquence, la puissance ainsi que les caractéristiques du transducteur.

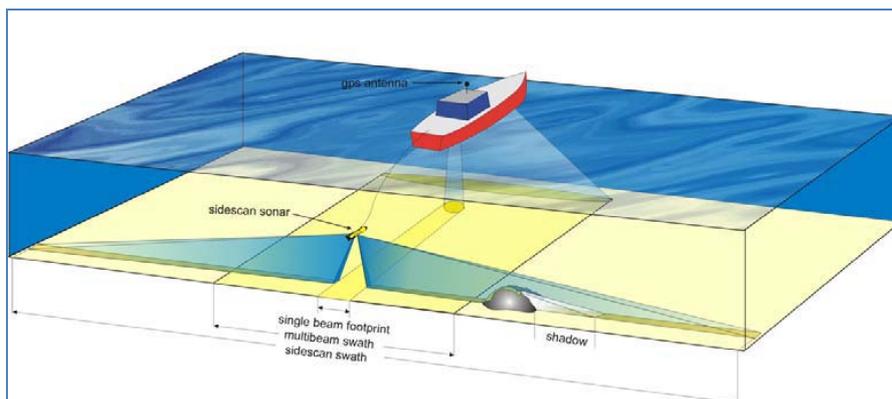


Figure 14 : Représentation des deux faisceaux (en bleus) fournis par les transducteurs du sidescan sonar (Hamilton, 2005).

Puisque le faisceau atteint le fond avec une direction qui n'est pas perpendiculaire à celui-ci, la plupart de l'énergie n'est pas réfléchi en direction du transducteur. La partie rétrodiffusée est enregistrée pendant un certain temps, donnant une série d'amplitudes temporelles pour chaque impulsion. Puisque le navire avance, en juxtaposant les différentes séries d'amplitudes on obtient alors des images des énergies (Fig. 15).

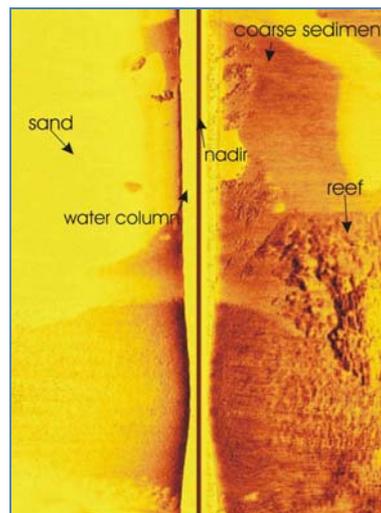


Figure 15. Image obtenue à partir d'un sidescan sonar (Hamilton, 2005).

On voit que les différentes textures du fond vont donner les nuances de l'image. Le point fort du sidescan sonar est sa large vision (environ 150m de chaque côté) qui lui permet d'étudier une zone rapidement. On peut noter qu'il y a une zone aveugle de chaque côté de la ligne de trajectoire du bateau due à la géométrie du faisceau. Le principe de classification des fonds grâce à ce type d'appareil se fait en segmentant les images en zones portant la même signature acoustique. Cette opération peut être effectuée à l'œil ou grâce à des logiciels de traitement d'images.

Les sidescan sonars sont utilisés depuis les années 1970, mais aucune publication concernant la classification des fonds n'a été réalisée jusqu'au début des années 1990. Leur exploitation permet de faire de la caractérisation géologique à large échelle.

Barnhardt et Kelley (1998) ont utilisé un sidescan sonar pour cartographier et classier une zone du golf du Maine. Cette étude a été réalisée par classification visuelle des images et validation de la nature du substrat par prélèvement direct. Brown *et al.* (2002) ont utilisé le logiciel DelphMap pour classier les habitats de la faune présente dans la Manche à partir d'images provenant d'un sidescan sonar.

On peut également noter des travaux récents réalisés par Kaeser et Litts (2008, 2010) qui ont caractérisé le substrat du lit d'une rivière sur 27 km en trois heures et demi d'acquisition grâce à un sidescan sonar installé sur une petite embarcation. Sept types de substrats ont pu être définis. De plus, ils ont pu repérer des troncs d'arbres immergés tout au long du parcours. Cependant, la partie traitement de données reste lourde à mettre en place.

## 5.2. Les sondeurs multi faisceaux.

Un sonar multi faisceaux peut émettre simultanément quatre cents faisceaux (pour certains modèles) ayant chacun un faible angle d'ouverture (quelques dixièmes de degrés) et l'angle d'ouverture total formé par tous ces faisceaux est généralement de plus d'une centaine de degrés (Fig. 16).

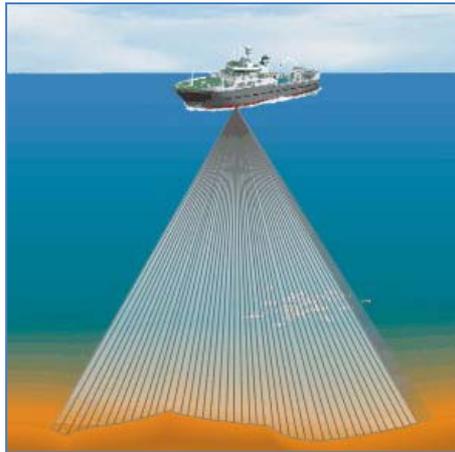


Figure 16. Représentation des faisceaux d'un sonar multi faisceaux (d'après [www.simrad.com](http://www.simrad.com)).

Ces systèmes sont très utilisés pour réaliser de la bathymétrie à haute résolution, mais peuvent également servir à la classification des fonds par analyse d'images, en utilisant le même principe que les sidescan sonars.

Cependant, le développement de nouvelles méthodes de classification fait parti des recherches actuelles. Certains fabricants ont déjà mis sur le marché des systèmes opérationnels mais qui ont été peu testés et non validés par la communauté scientifique. On peut noter la publication d'un article écrit par Brown *et al.* (2010) utilisant le logiciel QTC-multiview pour faire de la classification à partir d'images provenant d'un sonar multi faisceaux. La conclusion de cet article est que l'utilisation de ce logiciel peut être complémentaire d'une analyse d'images classique. Sur le panel de données acquis, neuf classes de substrats ont été identifiées par le logiciel. Il s'est avéré que deux d'entre elles étaient dues à des artefacts d'acquisitions. Suite aux résultats du « ground truth », les sept classes restantes correspondent à sept tailles de grains différentes (de sable grossier à gravier).

Tableau : récapitulatif des différents systèmes permettant  
 de faire de la classification des fonds aquatiques :

Systèmes		Avantages	Inconvénients	Publications	
<b>Hydroacoustiques</b>	Mono faisceau	RoxAnn et QTC View Série IV Logiciels Sonar5 – VBT à partir de données sondeur	-prix -mise en œuvre -capacité de détecter un large panel de substrats	-Inefficace en zone peu profonde (<5 m) - faible couverture angulaire -vitesse limite -problème en zone trop pentue	Chevillon, 2000 Hamilton, 2001 Collins and Lacroix , 1997 Collins and Galloway, 1998 Hamilton <i>et al.</i> 1999 Self <i>et al.</i> , 2001 Anderson <i>et al.</i> , 2002 Freitas <i>et al.</i> , 2003 a,b, 2005, 2006
		QTC View Série V	- prix - mise en œuvre -capacité de détecter un large panel de substrats <b>-opérationnel en zone très peu profonde (à partir d'un mètre)</b>	- faible couverture angulaire -vitesse limite -problème en zone trop pentue	Riegl <i>et al.</i> , 2005 a,b Hutin <i>et al.</i> , 2005 Freitas <i>et al.</i> , 2008
	Multi faisceaux		-grande couverture angulaire - capacité de détecter un large panel de substrat -bathymétrie à haute résolution	-Coût	Brown <i>et al.</i> , 2010 Hamilton, 2005
	Sidescan sonar		-grande couverture angulaire -ne permet pas de faire de la bathymétrie précise	-Coût -difficile à mettre en œuvre -moins pointu dans la détermination des substrats	Barnhardt et Kelley, 1998 Brown <i>et al.</i> , 2002 Hamilton, 2005
<b>traditionnels</b>	Benne à sédiment		-certitude sur la nature du substrat prélevé	-nécessite une extrapolation importante liée à la ponctualité de l'échantillonnage -limité par la dureté du substrat et par la longueur du câble	
	Caméra vidéo		-permet de valider les substrats qui ne sont pas pris en compte par la benne à sédiment	-nécessite une extrapolation importante liée à la ponctualité de l'échantillonnage -profondeur maximale limité par la longueur du câble	

## 6. Conclusion.

Il y a trois technologies permettant de faire de la caractérisation de substrat subaquatique : les sondeurs mono faisceau, les sondeurs multi faisceaux et les sidescan sonars. Le choix de l'un de ces systèmes dépend de l'étendue de la surface à caractériser, de la résolution spatiale attendue, de la résolution de la taille de grain que l'on veut atteindre et du coût.

Le système le moins cher et le plus simple d'utilisation est le sondeur mono faisceau couplé avec un des systèmes de discrimination (RoxAnn ou QTC View) dont la principale limite d'utilisation est sa résolution spatiale. Ces systèmes paraissent les plus appropriés à l'étude des zones lacustres. Les substrats sont en général bien différenciés et les limites d'utilisation sont liées à des paramètres tels que vitesse, pente, profondeur.

Les sidescan sonars, d'un coût plus élevé, permettent de couvrir plus facilement les zones d'étude et fournissent des informations sur la texture du sol donc sur sa morphologie à partir des analyses d'images. Ce sont des outils très utiles pour la délimitation de frontières entre différents types de substrats. Un des gros points faibles de ces appareils est qu'ils ne permettent pas de faire de la bathymétrie précise. Une association sidescan sonar et échosondeur mono faisceau permet une analyse pointue.

Enfin, l'approche la plus prometteuse mais très onéreuse, est l'utilisation des sondeurs multi faisceaux qui grâce à de nouveaux logiciels de traitement des signaux réverbérés permettent de faire de la classification des fonds à grande échelle.

La classification des fonds lacustres et marins par les méthodes acoustiques est donc réalisée depuis de nombreuses années. Les méthodes sont fonctionnelles et si elles peuvent être considérées comme des méthodes fiables, la validation *in situ* des classifications est toujours nécessaire et obligatoire. Il reste par ailleurs des incertitudes liées au type de matériel utilisé, au substrat sondé et à l'environnement (profondeur, pente, vitesse, ...).

## 7. Bibliographie.

2000/60/EC Directive of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Official Journal of the European Communities* L 327, 22.12.2000, 1–73.

Anderson, J.T., Gregory, R.S., Collins, W.T., 2002. Acoustic classification of marine habitats in coastal Newfoundland. *ICES Journal of Marine Science* 59, 156-167.

Barnhardt, W.A., Kelley, J. T., Dickson, S.M. and Belknap, D.F. (1998). "Mapping the Gulf of Maine with Side-Scan Sonar: A New Bottom-Type Classification for Complex Seafloors." *Journal of Coastal Research* 14(2): 646-659.

Brouwer P.A.I. 2008. Seafloor classification using single beam echosounder. Master thesis. Delft University of Technology.

Brown C.J., Todd B.J., Kostylev V.E., Pickrill R.A. (2010). "Image-based classification of multibeam sonar backscatter data for objective surficial sediment mapping of Georges Bank, Canada" *Continental Shelf Research*, doi:10.1016/j.csr.2010.02.009.

Brown, C.J., Cooper, K.M., Meadows W.J., Limpenny D.S. and Rees H.L. (2002). "Small-scale Mapping of Sea-bed Assemblages in the Eastern English Channel Using Sidescan Sonar and Remote Sampling Techniques." *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 54(2): 263-278.

Burczynski J., 1995. [www.biosonicsinc.com/doclibrary/docs/bottomclassification.pdf](http://www.biosonicsinc.com/doclibrary/docs/bottomclassification.pdf)

circulaire DCE 2005/11 relative à la typologie nationale des eaux de surface (cours d'eau, plans d'eau, eau de transition et eaux côtières) en application de la directive 2000/60/DCE du 23 octobre 2000 du Parlement et du Conseil établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau.

Chevillon, C., 2000. Rapport d'activité pour l'année 2000. Caractérisation des types de fonds et habitats benthiques par classification hydro-acoustique dans le lagon Sud-Ouest de nouvelle Calédonie. Centre IRD, BP A5 Nouméa.

Cholwek, Bonde, Li, Richards, Yin, (2000) "Processing RoxAnn sonar data to improve its categorization of lake bed surficial substrates", *Marine Geophysical Researches* 21, 409-421.

Collins M.B., Voulgaris G., (1993). Empirical field and laboratory evaluation of a real-time acoustic sea bed surveying system. *Proceedings of the Institute of Acoustics*, Vol. 15, Part 2, 343-351.

Collins, W.T., Galloway, J., 1998. Seabed classification and multibeam bathymetry: tools for multidisciplinary mapping. *Sea Technology* 39, 45-49.

Collins, W.T., Lacroix, P., 1997. Operational philosophy of acoustic waveform data processing for seabed classification. Proceedings of Coastal Open Space Utilization (COSU '97) International Conference, Singapore, Malaysia 1, 225-234.

Collins, W.T., Rhynas, K.P., 1998. Acoustic Seabed Classification Using Echo Sounders: Operational Considerations and Strategies. Proceedings of the Canadian Hydrographic Conference '98, Victoria, B.C., Canada. Canadian Hydrographic Service, Ottawa, Ontario, 384-390 pp.

Ellingsen, K.E., Gray, J.S., Bjørnbom, E., 2002. Acoustic classification of seabed habitats using the QTC VIEW\_ system. ICES Journal of Marine Science 59, 825-835.

Freitas R., Rodriguez A.M., Morris E., Perez-Llorenz J.L., Quintino V., (2008) "Single-beam acoustic ground discrimination of shallow water habitats : 50 kHz or 200 kHz frequency survey?" Estuarine, Coastal and Shelf science 78, 613-622.

Freitas, R., Rodrigues, A.M., Quintino, V., 2003a. Benthic biotopes remote sensing using acoustics. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 285-286, 339-353.

Freitas, R., Sampaio, L., Oliveira, J., Rodrigues, A.M., Quintino, V., 2006. Validation of soft bottom benthic habitats identified by single-beam acoustics. Marine Pollution Bulletin 53, 72-79.

Freitas, R., Sampaio, L., Rodrigues, A.M., Quintino, V., 2005. Sea-bottom classification across a shallow water bar channel and near shore shelf, using single beam acoustics. Estuarine, Coastal and Shelf Science 65, 625-632.

Freitas, R., Silva, S., Quintino, V., Rodrigues, A.M., Rhynas, K., Collins, W.T., 2003b. Acoustic seabed classification of marine habitats: studies in the Western Portuguese coastal shelf. ICES Journal of Marine Science 60, 600-609.

Hamilton E. L. (1980) "Geoacoustic modeling of the sea floor." *Journal of the Acoustical Society of America* . 68/51, 1313-1340

Hamilton E.L., Bachman R.T. (1982) "Sound velocity and related properties of marine sediments" . *Journal of the Acoustical Society of America* . 72(6), 1891-1903

Hamilton, L.J., Mulhearn, P.J. and Poeckert, R. (1999). "Comparison of RoxAnn and QTC View acoustic bottom classification system performance for the Cairns area, Great Barrier Reef, Australia." *Continental Shelf Research* 19: 1577-1597.

Hamilton, L.J., Mulhearn, P.J., Poeckert, R., 1999. Comparison of RoxAnn and QTC-View acoustic bottom classification system performance for the Cairns area, Great Barrier Reef, Australia. *Continental Shelf Research* 19, 1577-1597.

Hearn S.J., Williamson H.J., Ockenden M.C., Waters C.B., (1993). Fine resolution acoustic mapping related to sediment erosion shear strength. Proceedings of the Institute of Acoustics, Vol. 15, Part 2, 41-48.

Hutin, E., Simard, Y., Archambault, P., 2005. Acoustic detection of a scallop bed from a single-beam echosounder in the St. Lawrence. *ICES Journal of Marine Science* 62, 966-983.

Kaesler A.J., Litts T.L., (2008) "An Assessment of Deadhead Logs and Large Woody Debris Using Side Scan Sonar and Field Surveys in Streams of Southwest Georgia", *American Fish Society* vol 33 No 12, December 2008, 589-597.

Kaesler A.J., Litts T.L., (2010) "A Novel Technique for Mapping Habitat in Navigable Streams Using Low-cost Side Scan Sonar", *American Fisheries Society* vol 35 No 4, April 2010, 163-174.

Lurton X., Pouliquen E., (1994) « Identification de la nature du fond de la mer à l'aide de signaux d'échosondeurs : I Modélisation d'écho réverbérés par le fond », « *Acta Acoustica 2* », 113-126.

Lurton X., Pouliquen E., (1994) « Identification de la nature du fond de la mer à l'aide de signaux d'échosondeurs : II Méthode d'identification et résultats expérimentaux », « *Acta Acoustica 2* », 187-194

McKinney, C.M. and Anderson C.D. (1964). "Measurements of backscattering of sound from the ocean bottom." *Journal of the Acoustical Society of America* 36(1): 158-163.

Orowski A., (1984) "Application of multiple echoes energy measurements for evaluation of sea bottom type." *Oceanologia* 19, 61-78.

Pouliquen E., and Lurton X. 1992. Sea-bed identification using echosounder signal. *European Conference on Underwater Acoustics*, Elsevier Applied Science, London and New York, p. 535.

Pourriot R. et Meybeck M., 1995, *Limnologie générale*. Paris, Masson, 956 p.

Riegl, B.M., Moyer, R.P., Morris, L., Virnstein, R., Dodge, R.E., 2005a. Determination of the distribution of shallow-water seagrass and drift algaecommunities with acoustic seafloor discrimination. *Revista de Biología Tropical* 53 (Suppl. 1), 165-174.

Riegl, B.M., Moyer, R.P., Morris, L.J., Virnstein, R.W., Purkis, S.J., 2005b. Distribution and seasonal biomass of drift macroalgae in the Indian River Lagoon (Florida, USA) estimated with acoustic seafloor classification (QTC View, Echoplus). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 326, 89-104.

Self, R.F.L., A'Hearn, P., Jumars, P.A., Jackson, D.R., Richardson, M.D., Briggs, K.B., 2001. Effects of macrofauna on acoustic backscatter from the seabed: field manipulations in West Sound, Orcas Island, Washington, U.S.A. *Journal of Marine Research* 59, 991-1020.

Smith, G.F., Bruce, D.G. and Roach, E.B. (2001). "Remote acoustic assessment techniques used to characterise the quality and extent of oyster bottom in the Chesapeake Bay." *Marine Geodesy* 24, 171-189.

Voulgaris G., Collins M.B., (1990). « USP RoxAnn ground discrimination system : a preliminary evaluation. ARE Portland UTH Tech Memo 36/90. RE005314. University of Southampton, Department of Oceanography, Marine Consultancy Services, Technical Report No : SUDO/TEC/90/5C.33pp+39 figs+3 charts.

Waples J.T., Paddock R., Janssen J., Lovalvo D., Schulze B., Kaster J., Val Klump J., 2005. High Resolution Bathymetry and Lakebed Characterization in the Nearshore of Western Lake Michigan. Internat. Assoc. Great Lakes Res., 2005. J. Great Lakes Res. 31 (Supplement 1):64–74.

Onema  
Hall C – Le Nadar  
5 square Félix Nadar  
94300 Vincennes

01 45 14 36 00  
[www.onema.fr](http://www.onema.fr)

Inra  
147 rue de l'Université  
75338 Paris Cedex 07

01 42 75 90 00  
[www.inra.fr](http://www.inra.fr)

Classification des fonds lacustres par hydroacoustique.

Thomas Poulain  
Christine Argillier  
Jean Guillard