Evaluation de l'apport d'un sondeur de sédiment pour l'estimation des épaisseurs de sédiments dans les retenues de barrage

J.R. Courivaud, Alain Alexis, H. Pujo, J. Lorin

► To cite this version:

J.R. Courivaud, Alain Alexis, H. Pujo, J. Lorin. Evaluation de l'apport d'un sondeur de sédiment pour l'estimation des épaisseurs de sédiments dans les retenues de barrage. La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau, 2005, 90 99, 10.1051/lhb:200501012 . hal-01006820

HAL Id: hal-01006820

<https://hal.science/hal-01006820>

Submitted on 15 Feb 2019

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.

Evaluation de l'apport d'un sondeur de sédiment pour l'estimation des épaisseurs de sédiments dans les retenues de barrage

J.-R. Courivaud¹, A. Alexis², H. Pujo¹, J. Lorin³

Mapping of sediment thickness and the total volume of sediment deposited in the reservoirs are essential data to deal with both quantitative and qualitative problems caused by siltation. When the topography of the initial ground level of the reservoir is unknown, it is necessary to use specific measurement technologies to value sediment thickness and total volume of sediment. EDF has carried out a research project which aim was to evaluate the most promising technologies in that field in the present state of the art. In the frame of this project, a chirp sonar has been evaluated. A methodology to produce and validate the results has been defined. An experimental study of sound celerity in sediments and attenuation sensitivity has been carried out. A first evaluation of the capability of this sonar to determine sediment thickness maps was carried out in Cadarache desilting basin which permitted to have a first view of the limitations of this technology.

I ■ INTRODUCTION

La connaissance de la carte des épaisseurs de sédiments déposés dans une retenue de barrage et de leur volume global est une donnée essentielle, tant pour la gestion quantitative que pour la gestion qualitative du stock de sédiments.

Estimer le volume global du stock de sédiments et la carte des épaisseurs dans une retenue relativement récente, pour laquelle on dispose de la topographie du fond avant mise en eau, ne pose pas de problème particulier. Un différentiel entre la bathymétrie la plus récente et la topographie avant mise en eau fournit les informations recherchées avec une incertitude généralement acceptable. Mais pour un nombre significatif de retenues souvent anciennes, on ne dispose pas ou plus d'informations topographiques des fonds avant la mise eau. Dans ce cas, il est nécessaire d'avoir recours à des méthodes de mesures spécifiques pour déterminer le volume global du stock de sédiments et la carte des épaisseurs.

Afin de déterminer les méthodes les mieux adaptées permises par l'état de l'art actuel, EDF a lancé un programme de recherche visant à évaluer les techniques les plus promet-

teuses. Dans ce cadre, un sondeur de sédiment de type « chirp » a été évalué. Cette étude a permis de définir une méthodologie de mise en œuvre et de validation de cette technique, et d'avoir une première idée du contour de son domaine d'utilisation.

II ■ DESCRIPTION DU SYSTÈME DE MESURE, PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT ET MÉTHODOLOGIE POUR LA PRODUCTION ET LA VALIDATION DES RÉSULTATS

● II.1 Le système de mesure

Le sondeur de sédiment évalué dans cette étude relève de la sismique réflexion monotracer légère, le sondeur émettant un signal acoustique en modulation de fréquence entre 2 et 15 kHz. Le système de mesure (cf. *fig. 1*) est constitué d'un « poisson » remorqué par une embarcation et immergé à une profondeur variable, d'une unité de génération et de traitement du signal et d'un moniteur. Un système GPS différentiel fournit les informations de positionnement planimétrique à l'unité centrale du sondeur.

1. EDF, Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement.
2. Laboratoire de Génie Civil de l'IUT de Nantes-Saint Nazaire.
3. Consultant-Expert en Sédimentologie.

Figure 1 : Eléments composant le sondeur de sédiment utilisé.

● II.2 Principe de fonctionnement

• Caractéristiques principales de la source d'émission

La source d'émission de ce sondeur de sédiment utilise la technologie « chirp », c'est-à-dire qu'elle produit un signal acoustique généré numériquement sous forme d'impulsions modulées en fréquence et en amplitude de très courte durée (17 ms), ce qui permet d'obtenir une bonne résolution (cf. [1]). La plage de fréquence de cette source peut être soit 2-10 kHz, soit 2-12 Hz, soit 2-15 kHz. Ce signal numérique est ensuite converti en signal analogique, puis amplifié. Le signal amplifié est envoyé sur un transducteur, contenu dans le « poisson » remorqué et immergé. Le transducteur est une céramique piézoélectrique qui, excitée par le signal électrique, émet un signal acoustique. L'onde émise par le transducteur va générer dans l'eau une bulle de vide qui va imploser et générer une onde de pression se propageant dans toutes les directions.

• Propagation du signal

L'onde de pression émise par l'implosion de la bulle de vide se décompose schématiquement en une onde de compression (entraînant un déplacement des particules parallèle à sa direction de propagation) et une onde de cisaillement (entraînant un déplacement des particules perpendiculaire à sa direction de propagation). Les ondes de cisaillement ne se propagent pas dans l'eau, seule l'onde de compression va se propager et en particulier, atteindre l'interface eau/sédiment.

A chaque interface atteinte (interface eau/sédiment, interface du type sédiment/sédiment ou interface sédiment/terrain naturel), une partie de l'énergie de l'onde de compression est réfléchie, une partie se propage le long de l'interface (onde réfractée) et une partie est transmise dans le milieu suivant. Dans chaque milieu traversé, une partie de l'énergie de l'onde incidente est absorbée. L'absorption totale de l'énergie de l'onde incidente dans un milieu donné est caractérisée par le coefficient $\alpha = \pi f / (Q \cdot v)$, où f et v sont respectivement

la fréquence et la célérité de l'onde acoustique et Q le facteur lithologique, qui dépend du matériau. La définition de ce coefficient montre en particulier que plus la fréquence de l'onde est élevée et plus l'absorption est importante. On voit donc apparaître la principale difficulté à laquelle sera confrontée une méthode sismique appliquée aux retenues : la nécessité de trouver un compromis entre la fréquence de la source d'émission, qui doit être la plus basse possible pour limiter l'absorption mais inversement, qui doit être élevée pour bénéficier d'une bonne résolution, et le poids/encombrement de la source d'émission, qui croît très vite lorsque la fréquence diminue.

• Réception et traitement du signal

La réception du signal s'effectue par une série d'hydrophones contenus dans le « poisson ». Les hydrophones sont des céramiques piézoélectriques qui transforment la pression acoustique due à l'onde réfléchie en tension électrique. Après avoir été amplifié, ce signal est converti en signal numérique, puis convolué avec le signal émis. L'enveloppe de cette convolution est traduite en niveaux de gris sur 16 bits (ce type de résultat s'appelle un sismogramme).

Le résultat de la mesure est donc une valeur numérique sans unité, comprise entre 0 et 32 768 (numérisation sur 16 bits), qui est l'amplitude de la fonction d'intercorrélation, reliée, du point de vue de l'interprétation physique, au coefficient de réflexion si le signal est réfléchi par un réflecteur⁴. Une amplitude importante du signal reçu, représentée par un blanc sur le sismogramme, signifie donc que l'onde émise s'est fortement réfléchie sur le réflecteur. La distance entre ce réflecteur et le « poisson » est égale au produit de la

4. Le coefficient de réflexion entre deux milieux d'impédance acoustique Z_1 et Z_2 est $R = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}$. La limite entre ces deux milieux d'impédance différente est appelée réflecteur.

célérité de l'onde par la moitié du temps de trajet aller-retour de l'onde⁵.

• Post-traitement du signal

Le post-traitement du signal consiste à appliquer des opérations sur le résultat de la mesure du sondeur de sédiments, à savoir l'enveloppe convoluée numérisée sur 16 bits, afin de faire ressortir le mieux possible les informations que l'on recherche sur la nature du sous-sol. Ce post-traitement consiste principalement en deux étapes : le filtrage et l'amplification.

Le filtrage consiste à éliminer, dans le signal résultat de la mesure, certaines plages de fréquences, afin de faire ressortir sur le sismogramme l'information recherchée.

Le principal gain disponible sur le sondeur de sédiment utilisé est du type TVG (Time Variant Gain). Il s'agit d'un gain croissant en fonction du temps : il pallie l'atténuation sphérique qui augmente avec la distance à la source d'émission⁶.

● II.3 Méthodologie pour la production et la validation des résultats

Le processus de production et de validation des résultats est constitué par les étapes suivantes :

1. Interprétation des sismogrammes

Un exemple de sismogramme est représenté sur la *figure 2*. Il représente le niveau de réflexion de l'onde acoustique en niveaux de gris (noir = faible réflexion, blanc = forte réflexion) pour chaque « tir » acoustique (n° de tir en abscisse, associé à une position géographique) et en fonction du temps de trajet aller-retour de l'onde (temps double, en ordonnée). L'objectif de la phase d'interprétation d'un sismogramme est de sélectionner les marqueurs⁷ qui correspondent à des réflecteurs, c'est-à-dire à des limites physiques entre deux milieux d'impédance différente. L'opération de sélection des marqueurs est réalisée actuellement manuellement. Le travail consiste tout d'abord à repérer les marqueurs qui ne correspondent pas à des réflecteurs multiples, échos latéraux, autres artefacts. Les marqueurs restants sont ensuite réexaminés un par un et, s'ils ne sont pas invalidés, sont sélectionnés comme réflecteurs.

2. Numérisation des réflecteurs

Une fois sélectionné sur papier, chaque réflecteur est numérisé dans un fichier, à l'aide du logiciel de dépouillement. Chaque ligne du fichier comprend les coordonnées planimétriques et le temps double mesuré correspondant au trajet source d'émission — réflecteur-récepteur.

5. Plus rigoureusement, lorsque l'onde traverse successivement les couches homogènes i , la distance entre le poisson et le réflecteur est égale à : $\sum_i c_i \cdot t_i$,

où c_i et t_i sont respectivement la célérité et la durée de propagation dans la couche homogène i . Cependant, la seule durée mesurée par le chirp est le temps global de trajet aller-retour, encore appelé temps double.

6. Une source sonore émet une onde dont la quantité d'énergie reste constante dans le temps. Au cours du temps, cette énergie se disperse sur des surfaces d'ondes sphériques de plus en plus grandes. Il s'en suit que l'énergie acoustique ramenée à une surface unitaire décroît au cours du temps. Ce phénomène est appelé atténuation par divergence géométrique. La perte d'énergie par divergence géométrique est strictement proportionnelle au carré de la distance à la source.

7. Sur un sismogramme, un marqueur est un ensemble de points clairs, joints ou disjoints, et peut représenter soit un réflecteur, soit un multiple d'un réflecteur, soit un écho latéral, soit un autre type d'artefact sismique.

3. Validation des réflecteurs par vérification de cohérence

Les routes suivies in situ lors du sondage ont été définies de manière à représenter un maillage horizontal régulier. Les nœuds de ce maillage appartiennent donc à deux routes à peu près perpendiculaires. Si un réflecteur existe en un nœud, il doit avoir été détecté sur les deux routes qui se croisent en ce nœud. Un schéma de routes « maillées » (trajectoires suivies par le poisson) est représenté sur la *figure 3* ci-dessous.

Pour qu'un réflecteur soit validé, il faut donc qu'il ait été identifié sur deux routes différentes se croisant en un nœud.

4. Constitution des fichiers d'épaisseurs et d'altitude

Cette étape du dépouillement consiste à positionner dans l'espace les réflecteurs validés à l'étape précédente.

On génère dans un premier temps un fichier d'épaisseurs, à l'aide du logiciel de dépouillement, pour chaque couche sédimentaire comprise entre deux réflecteurs. Ce fichier est constitué, pour un ensemble de tirs, des positions planimétriques et des épaisseurs correspondantes en mètres. Cette opération nécessite d'indiquer au logiciel la valeur de célérité du son dans la couche sédimentaire considérée, afin de passer des temps doubles à des épaisseurs en mètres. A ce stade, on est en mesure de dresser une carte des épaisseurs des couches sédimentaires mises en évidence, mais ces couches ne sont pas encore calées en altitude.

Le calage en altitude des interfaces est obtenu en fixant comme altitudes de l'interface eau/sédiments détectée par le sondeur de sédiment les altitudes déterminées par une bathymétrie récente. Cette méthode présente cependant l'inconvénient de ne pas pouvoir maîtriser les éventuels écarts entre l'altitude de l'interface eau/sédiment mesurée par la bathymétrie et celle de cette même interface détectée par le sondeur de sédiments⁸.

L'interface eau/sédiment étant calée en altitude, on en déduit ensuite l'altitude des autres interfaces à partir des fichiers d'épaisseurs. On obtient à la fin de cette phase un fichier numérique global contenant les positions géométriques de l'ensemble des interfaces (ensembles de positions X , Y , Z) et la carte des épaisseurs (ensembles de triplets X , Y , Epaisseur). La phase suivante consiste à valider ces résultats à l'aide d'autres données.

5. Validation des résultats à l'aide d'autres données

L'étape de validation à l'aide d'autres données demeure absolument nécessaire et peut nécessiter des moyens expérimentaux supplémentaires, mis en œuvre in situ. Le principe de cette validation est de comparer les résultats du sondeur de sédiments soit à des données préalablement existantes (topographie des fonds avant mise en eau, bathymétrie), soit à des données acquises pour la validation à l'aide d'autres moyens de mesure que les moyens acoustiques (sondage à la tige, carottage) et préalablement calées en altitude. En fonction du degré de connaissance des sédiments de la retenue étudiée et des informations recherchées, les objectifs de cette étape sont les suivants :

— Si la célérité du son dans les sédiments rencontrés est mal connue, un certain nombre d'interfaces fournies par les données de validation serviront à la caler (il s'agit alors en

8. Ces écarts pourraient être dus à des modifications de la cote du fond dans l'intervalle de temps séparant la bathymétrie du sondage avec le sondeur de sédiments mais aussi à des altitudes de réflexion différentes des ondes acoustiques du sondeur bathymétrique et du sondeur de sédiments dues à la différence de fréquence d'émission de ces deux appareils de mesure.

EXEMPLE DE SISMOGRAMME

Figure 2

Figure 3 : Schéma des routes suivies par le poisson.

fait d'un calage des résultats du sondeur de sédiments et non d'une validation).

— Si l'on ne s'intéresse qu'à l'estimation du volume global de sédiments dans la retenue, on cherchera uniquement à valider l'interface sédiments/terrain naturel.

— Si l'on s'intéresse également à l'identification de couches sédimentaires à l'intérieur du volume global, on cherchera à valider l'ensemble des interfaces détectées avec le sondeur de sédiments.

III ■ ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE LA SENSIBILITÉ DE CERTAINS PARAMÈTRES

Afin de mieux comprendre la sensibilité de certains paramètres importants, une étude expérimentale a été réalisée dans le cadre d'une collaboration scientifique entre EDF et le Laboratoire de Génie Civil de l'IUT de Nantes Saint-Nazaire. Les questions qui sous-tendaient cette étude étaient les suivantes :

Quelle est la variabilité de la célérité du son dans les sédiments et quelles sont les valeurs de cette célérité en fonction

du type de sédiment ? Y a-t-il d'autres paramètres qui influencent la célérité du son dans les sédiments ?

Les réponses à ces questions sont importantes pour être capable de convertir correctement en distances les résultats bruts du « chirp » qui sont déterminés initialement en temps.

L'étude bibliographique menée pour rechercher des données synthétiques de référence de vitesse des ondes acoustiques dans les divers types de matériaux rencontrés en géotechnique a montré que ce type de données est rare dans la littérature (cf. [2, 3, 4, 5]). Pour pallier ce manque de données, un prototype de célérimètre de laboratoire a été construit, avec des caractéristiques acoustiques proches de celles du sondeur de sédiment. Ce prototype a permis d'étudier la variabilité de la célérité du son sur des échantillons prélevés sur l'un des sites où a été évalué le sondeur de sédiments.

Les sédiments bruts utilisés pour ces essais étaient du type vase, avec un pourcentage de la fraction supérieure à 40 μm inférieur à 10 % et une teneur en eau comprise entre 50 et 60 %. Deux séries d'essais ont été réalisées :

a) Essais avec des échantillons ayant une teneur en eau fixe de 40 % (concentration 1 300 g/l) et une fréquence d'émission variant de 4 à 20 kHz. Les résultats de ces essais sont représentés sur la *figure 4* ci-dessous.

Figure 4 : Evolution de la célérité du son (m/s) dans un échantillon de sédiments en fonction de la fréquence.

b) Essais avec une fréquence d'émission fixe (4 kHz) et une teneur en eau variant de 40 % à 120 % (concentrations de 1 300, 1 030, 855, 730 et 640 g/l), par pas de 20 %. Cette plage de teneurs en eau est représentative des valeurs ren-

contrées dans les sédiments cohésifs. Les résultats de ces essais sont représentés sur la *figure 5* ci-dessous.

L'incertitude sur la célérité du son mesurée lors de ces essais est de ± 10 m/s.

Figure 5 : Evolution de la célérité du son dans un échantillon de sédiment en fonction de la teneur en eau.

Cette étude expérimentale sur la variabilité de la célérité du son a montré les points suivants : dans la gamme de fréquence étudiée, à savoir entre 4 kHz et 24 kHz et avec le sédiment de type vase utilisé :

- la célérité du son est non significativement dépendante de la fréquence par rapport aux incertitudes (résultat en accord avec la théorie, mais ce type de vérification expérimentale, bien qu'apparemment simple, n'apparaît pas dans la littérature) ;
- la célérité du son est indépendante de la teneur en eau (ou de la concentration) ;
- la célérité du son, pour le sédiment utilisé, est de l'ordre de $1\,590\text{ m/s} \pm 10\text{ m/s}$.

Il restera à étudier si ces propriétés d'indépendance de la célérité du son vis-à-vis de la fréquence et de la teneur en eau sont conservées pour les autres types de sédiments rencontrés dans les retenues. D'autres voies de recherche importantes à explorer concernent également les paramètres qui influencent l'atténuation.

IV ■ ÉVALUATION DU SONDEUR DE SÉDIMENT

L'objectif de cette évaluation a été de tester sur un premier site la mise en œuvre du sondeur de sédiment (adaptation aux conditions de mise en œuvre des retenues, fiabilité du système de mesure en conditions in situ), la méthodologie de production et de validation des résultats et enfin d'obtenir des premiers éléments sur les limites du domaine d'utilisation de cette technique.

Le site retenu pour cette évaluation est le bassin de délimonage de Cadarache (bassin faisant partie de la chaîne d'aménagements de la Durance) pour lequel on dispose de la topographie avant mise en eau. Sa superficie est de 122 ha à la cote de retenue maximale et la hauteur d'eau maximale ne dépasse pas 9,5 m. Environ 9 mois avant la reconnaissance réalisée avec le sondeur de sédiment, ce bassin avait fait l'objet d'un curage partiel. Les sédiments enlevés dans la partie Nord-Est du bassin ont été clapés dans la partie la plus profonde (cf. fig. 6). Une campagne de carottages et de sondages à la tige a également été réalisée sur ce site dans le

BATHYMETRIE ET POSITIONS DES CAROTTAGES

Figure 6

cadre de cette étude afin de disposer d'éléments sur les caractéristiques physiques des sédiments et sur d'éventuelles interfaces intermédiaires. Les carottages et les enfoncements de tige ont été effectués en 7 points (cf. fig. 6).

• Résultats obtenus

Le sondeur de sédiment a permis de détecter des réflecteurs dans le secteur Nord-Ouest du bassin, sur une superficie d'un peu plus de 5 ha, correspondant à une profondeur d'eau supérieure à 5 m et englobant le point de carottage n° 1 (cf. fig. 6) et la zone de clapage. Sur le reste du bassin où la profondeur d'eau est inférieure à 5 m, aucun marqueur correspondant à une interface physique n'a pu être identifié.

D'autre part, sur toute l'étendue du bassin ayant un faible tirant d'eau, un tapis d'algues très touffues a pu être observé. Ce type de végétation a certainement joué le rôle de miroir acoustique, rendant impossible toute pénétration des signaux sonores dans les sédiments.

Sur tout le secteur Nord-Ouest, deux interfaces se trouvant sous l'interface eau/sédiment ont pu être détectées : la première représente un dépôt dont l'épaisseur varie de 0,25 m à 2,25 m, pourrait correspondre à la couche de sédiments clapés ; la seconde représente un dépôt de 0 à 4,5 m, pourrait correspondre à l'interface sédiments/terrain naturel.

La carte des épaisseurs correspondant à la première couche est présentée sur la figure 7 et la carte des épaisseurs

CARTE DES EPAISSEURS DE LA COUCHE SUPERIEURE DES SEDIMENTS

Figure 7

correspondant à tout le dépôt de sédiments est présentée sur la *figure 8*.

- **Validation des résultats**

La validation des résultats a porté sur les éléments suivants :

— Validation des résultats obtenus par le sondeur de sédiment au point n° 1 par comparaison avec les résultats du

carottage, de l'enfoncement de tige et de la topographie du bassin avant mise en eau obtenus au même point.

— Validation par analyse des écarts entre la carte des altitudes du terrain naturel obtenue à partir des résultats du sondeur de sédiment et la carte équivalente du même secteur obtenue d'après la topographie avant mise en eau.

CARTE DES EPAISSEURS TOTALES DES SEDIMENTS

Figure 8

Les différents résultats obtenus au point n° 1 sont reportés dans le tableau 1 ci-dessous (les altitudes sont exprimées en mètres NGF normal).

Tableau 1 : Validation des résultats du sondeur de sédiment au point n° 1.

	Altitude obtenue par sondeur de sédiment	Altitude obtenue par carottage	Altitude obtenue par enfoncement de tige	Altitude obtenue par topographie avant mise en eau
Interface intermédiaire	245,25 ± 0,3	245,60	—	—
Interface plus profonde	244,22 ± 0,3	244,24	244,60	244,50

Cette validation confirme que l'interface plus profonde correspond bien au terrain naturel du bassin. L'écart entre le résultat issu du sondeur de sédiment et les données de validation ne dépasse pas 40 cm, ce qui est cohérent avec la précision que l'on peut attendre de ce type de mesure.

Les analyses des sédiments prélevés par carottage au point n° 1 confirment que l'interface intermédiaire correspond bien à la limite entre les sédiments clapés récemment (vase dés-structurée) et des sédiments plus anciens (alternances de sables et de vases).

Une autre méthode de validation consiste à analyser les écarts entre la carte des altitudes du terrain naturel obtenue à partir des résultats du sondeur de sédiment et la carte équivalente issue de la topographie avant mise en eau. Ces deux cartes sont des modèles numériques de terrain issus de l'interpolation de résultats de mesures (mesures du sondeur de sédiment ou mesures de la topographie avant mise en eau). Pour faciliter cette comparaison, un différentiel de ces deux cartes a été établi (cf. fig. 9), mentionnant les écarts issus de valeurs non interpolées en 5 points.

DIFFERENTIEL ENTRE LE TERRAIN NATUREL OBTENU AVEC LE SONDEUR DE SEDIMENT ET LA TOPOGRAPHIE INITIALE

Figure 9

On constate une cohérence acceptable dans une large moitié Nord-Ouest de la zone de comparaison, correspondant à la zone la plus dense en points de mesure du sondeur de sédiment, bien que localement, des écarts importants puissent être notés. En revanche, la partie Sud-Est de la zone présente des écarts importants, que l'on peut expliquer par un nombre plus faible de points de mesure issus du sondeur de sédiment et des erreurs d'interpolation plus importantes. Il n'est donc pas aisé de comparer deux modèles numériques de terrain issus de données d'interpolation différentes censés représenter la même surface.

V ■ CONCLUSION

L'évaluation in situ qui a été réalisée montre que lorsque les conditions de sondage sont à l'intérieur des limites de son domaine d'utilisation, les résultats du sondeur de sédiment permettent de dresser des cartes d'épaisseurs des sédiments déposés et d'estimer avec une précision convenable le volume du stock global de sédiments présents dans les retenues. L'incertitude sur les résultats d'épaisseurs de couches de sédiments est de l'ordre de $\pm$ plusieurs dizaines de cm. Remarquons que l'incertitude sur les résultats d'une bathymétrie réalisée avec les moyens de l'état de l'art actuel n'étant pas meilleure que ± 10 à 15 cm, l'incertitude sur les valeurs d'épaisseurs de sédiments déterminées à partir de différences de bathymétries est également de l'ordre de $\pm$ plusieurs dizaines de cm.

Cette évaluation a permis de mettre en évidence les éléments suivants concernant les limites d'utilisation du sondeur de sédiments :

- Limites liées aux caractéristiques de la retenue :
 - La hauteur d'eau de la zone de sondage ne doit pas être inférieure à 5 m.
 - L'interface eau/sédiments ne doit pas être recouverte d'un tapis d'algues touffues (qui joue le rôle de miroir acoustique).
- Limites liées aux conditions de mise en œuvre :
 - Système de mesure inapte à supporter des conditions très humides (fortes pluies).
 - La retenue doit présenter des conditions de mise à l'eau assez aisées.

D'autre part, certaines difficultés méthodologiques concernant la validation ont pu être mises en évidence :

- Difficultés à baser une validation des mesures sur les écarts entre des modèles numériques de terrain issus d'interpolations de ces données de mesures (les écarts réels entre données de mesures à valider et données de mesures de validation pouvant être noyées par les erreurs d'interpolation des modèles numériques que l'on compare).
- Différences de niveaux mesurés par les différentes techniques de mesure employées pour détecter l'interface sédi-

ment/terrain naturel. On constate des écarts de l'ordre de plusieurs dizaines de cm entre les altitudes de l'interface sédiments/ terrain naturel détectées par un sondage à la tige et par un carottage par exemple. Ces différences sont liées directement aux techniques d'enfoncement.

— Difficultés de s'assurer que les différentes données de mesure que l'on compare, provenant de techniques différentes, ont bien été acquises à la même position planimétrique. Les écarts de positionnement planimétrique peuvent entraîner des écarts importants sur les résultats d'altitudes des interfaces si la topographie du terrain naturel est très irrégulière et empêcher ainsi de conclure à une validation satisfaisante.

Comme toute méthode géophysique, le sondeur de sédiment est une technique qui possède des limites d'utilisation qu'il faut impérativement respecter pour obtenir des résultats satisfaisants. Cette étude s'est attachée à commencer à mettre en lumière ces limites. Il n'existe pas actuellement de technique universelle pour répondre au problème difficile de l'évaluation des quantités de sédiments déposés dans les retenues. Le sondeur de sédiment sera probablement une technique qu'il sera pertinent de mettre en œuvre sur certains types de retenues au côté d'autres moyens de mesures et pourra dans ce cas apporter une densité d'informations et donc une précision sur les résultats globaux recherchés (volume global du stock de sédiments, carte des épaisseurs) qu'aucune autre technique de mesure ne peut aujourd'hui fournir. Pour les retenues sortant de son domaine d'utilisation (faibles tirants d'eau, tapis d'algues très dense, pentes abruptes des fonds), les techniques classiques, basées sur des pénétrations ponctuelles (carottages, sondage à la tige) demeureront les seules applicables.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Edge Tech. X-STAR Full Spectrum Sub-bottom Profiler. Technical and User's Manual. February 1998.
- [2] ASTIER J.L. (1971). — Géophysique appliquée à l'hydrogéologie. Edition Masson, Paris, p. 277.
- [3] STÜMPPEL H., KÄHLER S., MEISSNER R., MILKEREIT B. (1984). — The use of seismic shear waves and compressional waves for lithologic problems of shallow sediments. *Geophysical Prospecting*, 32, pp. 662-675.
- [4] HALLEUX L. (1992). — Prospection géophysique en eau douce : voies hydrauliques, lacs, zones marécageuses. Thèse, Université de Liège, p. 241.
- [5] BONGIOVANNI K.-P., BADIEY M., SIEGMAN W.-L. (1995). — Shallow water sediment layer structure and composition effects on range — dependant acoustic propagation at the Atlantic Generating Station (A.G.S.) site. *Journal of the Acoustical Society of America*, 98, pp. 2249-2261.