

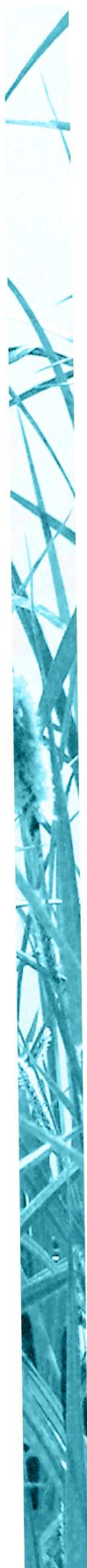
Bathymétrie des plans d'eau

Protocole d'échantillonnage et descripteurs morphométriques

*ALLEAUME Samuel
LANOISELEE Cédric
AGILLIER Christine*

CEMAGREF

Juin 2010



Contexte de programmation et de réalisation

La forme de la cuvette est un élément qui conditionne le fonctionnement des systèmes de par son impact sur la disponibilité des habitats et son influence sur l'hydrologie. Des études bathymétriques ont été initiées sur divers plans d'eau et par différents bureaux d'études. Les premiers retours de campagnes ont mis en évidence une grande disparité de qualités dans les relevés bathymétriques qui rend leur exploitation difficile à une échelle nationale pour évaluer l'état écologique des plans d'eau au sens de la DCE. .

Les auteurs

Samuel ALLEAUME

Ingénieur d'études

Email samuel.alleaume@cemagref.fr

Pôle hydro-écologie Plans d'eau , Cemagref - Groupement d'Aix en Provence

Unité Hydrobiologie, 3275 route Cézanne (RD 17 au Tholonet)

CS 40061 13182 Aix-en-Provence Cedex 5

Cédric LANOISELEE

Assistant ingénieur

Cedric.lanoiselee@cemagref.fr

Pôle hydro-écologie Plans d'eau - Cemagref - Groupement d'Aix en Provence

Unité Hydrobiologie, 3275 route Cézanne (RD 17 au Tholonet)

CS 40061 13182 Aix-en-Provence Cedex 5

Christine ARGILLIER

Directrice de Recherche

christine.argillier@cemagref.fr

Pôle hydro-écologie Plans d'eau - Cemagref - Groupement d'Aix en Provence

Unité Hydrobiologie, 3275 route Cézanne (RD 17 au Tholonet)

CS 40061 13182 Aix-en-Provence Cedex 5

Les correspondants

Onema : Jean-Marc BAUDOIN, jean-marc.baudoin@onema.fr

Référence du document :

Cemagref : Christine, ARGILLIER, Cemagref, christine.argillier@cemagref.fr

Référence du document :

[Autres renseignements nécessaires à la mise sur le Portail « les documents techniques sur l'eau », à renseigner si possible]

Droits d'usage :	<i>accès libre</i>
Couverture géographique :	<i>national</i>
Niveau géographique [un seul choix] :	
Niveau de lecture [plusieurs choix possibles] :	<i>Professionnels, experts</i>
Nature de la ressource :	<i>Document</i>

Bathymétrie des plans d'eau

ALLEAUME S., LANOISELEE C., AGILLIER C.,

Sommaire

Introduction	10
Conditions de réalisation	11
1. Principes de l'échosondage.....	11
2. Méthode d'acquisition sur le terrain	12
2.1. Matériel utilisé.....	12
2.2. Plan d'échantillonnage.....	13
2.2.1. Cotes du plan d'eau.....	13
2.2.2. Relevé bathymétrique	13
2.3. Format de restitution du relevé bathymétrique	15
2.4. Points de rive.....	15
2.5. Format de restitution des points de rive.....	16
3. Traitement des données	17
3.1. Interpolation des données.....	17
3.1.1. Principe de l'interpolation.....	17
3.1.2. Enveloppe pour l'interpolation	19
3.2. Correction des valeurs de profondeur.....	19
4. Extraction des descripteurs morphologiques	20

Bathymétrie des plans d'eau

ALLEAUME S., LANOISELEE C., AGILLIER C.,

Résumé

*[obligatoire pour un document final,
de préférence en une page y compris les mots-clés]*

RESUME

La forme de la cuvette est un élément qui conditionne le fonctionnement des systèmes lacustres de par son impact sur la disponibilité des habitats et son influence sur l'hydrologie et la sédimentologie.

Ce document propose une méthode de réalisation de relevés bathymétriques sur les plans d'eau à utiliser dans un contexte de caractérisation morphologique des systèmes au sens de la DCE. Un protocole d'échantillonnage de terrain est décrit par utilisation d'un échosondeur. Le principe de l'exploitation des données est ensuite proposé au travers de méthodes d'interpolation et d'extraction de descripteurs morphologiques identifiés sur la base d'une analyse de la littérature.

MOTS CLES (THEMATIQUE ET GEOGRAPHIQUE)

Lac, plan d'eau, hydromorphologie, bathymétrie, profondeur, volume, cuvette, descripteurs morphologiques, SIG,

Bathymétrie des plans d'eau*ALLEAUME S., LANOISELEE C., AGILLIER C.,***Abstracts**

*[obligatoire pour un document final,
de préférence en une page y compris les mots-clés]*

ABSTRACT

The shape of the lake basin impacts ecosystem functioning. Indeed, it determines habitats' availability, hydrology and sedimentology.

This report proposes a method to implement bathymetric surveys on lentic systems. These measures allow characterising morphology of lakes in the context of the implementation of the WFD. A field sampling protocol using an echo sounder is described. Then the principle of data use is proposed through interpolation methods and extraction of morphological descriptors.

Key words (thematic and geographical area)

Lake, hydromorphology, bathymetry, depth, volume, basin, morphological descriptors, GIS

Bathymétrie des plans d'eau

ALLEAUME S., LANOISELEE C., AGILLIER C.,

Synthèse pour l'action opérationnelle*[4 pages maximum]***Bathymétrie - Fiche technique**

Lanoiselée C., Alleaume S., CEMAGREF Aix-en-Provence, Juin 2010

Contexte

Cette fiche propose un protocole afin d'harmoniser les relevés bathymétriques réalisés sur les plans d'eau des réseaux DCE. L'objectif de ces relevés est l'extraction d'informations telles que la profondeur moyenne, la profondeur maximale, le volume, la forme de la cuvette, la surface de la zone littorale.

Matériel

Un échosondeur couplé à un GPS de précision métrique, permettant l'acquisition de données bathymétriques géoréférencées.

Ce couplage peut être issu d'un sondeur possédant un GPS intégré ou alors en reliant un échosondeur et un GPS. Ce matériel, doit pouvoir faire de l'acquisition automatique sur un pas de temps régulier.

Plan d'échantillonnage

Dans le cas d'un plan d'eau **naturel**, le levé bathymétrique doit être réalisé à une côte **supérieure** ou égale à la **côte moyenne annuelle**.

Dans le cas d'un plan d'eau **artificiel** le levé bathymétrique doit être réalisé à une côte **supérieure** ou égale à la **côte normale d'exploitation**.

Pour simplifier le discours, la côte moyenne annuelle et la côte normale d'exploitation sont désignées comme la **côte de référence**.

Les mesures sont à réaliser dans des conditions de vent faible afin d'éviter un effet de surcote localisé dû aux vagues.

Cotes du plan d'eau

Deux côtes altitudinales doivent être renseignées : la côte du plan d'eau au moment du relevé et la côte de référence.

1. La côte NGF du plan d'eau doit être renseignée pour la période de réalisation du relevé bathymétrique (**Cbat**). C'est un paramètre primordial pour les plans d'eau à fort marnage en termes d'amplitude et de fréquence. La côte du plan d'eau permet de transformer le niveau des eaux en une valeur altimétrique ramenée au niveau de la mer. Si la fréquence de marnage est très courte (journalière), la côte devra être prise à un pas de temps de même fréquence.

Le relevé de la côte se fait idéalement par lecture de l'échelle nivelée. Alternativement, on utilisera un altimètre de précision pour évaluer cette valeur. En cas de fréquence de marnage

important, il peut être intéressant de récupérer les chroniques de niveau d'eau, auprès du gestionnaire.

2. Renseigner la côte de référence (**Cref**) NGF : côte moyenne annuelle pour un lac naturel ou la côte normale d'exploitation pour une retenue. Cette information servira pour la correction des valeurs de profondeurs à la côte de référence.

Relevé bathymétrique

Le levé bathymétrique comporte 3 trajets (Figure 3)

- a) Une série de radiales en créneaux, perpendiculaires à la plus grande longueur du plan d'eau (rouge). Ces radiales seront espacées d'environ 50 mètres, et ramenées à 100 mètres dans le cas des plans d'eau de grande taille (1000 ha).
- b) Au moins, 1 radiale centrale, permettant de vérifier la qualité des mesures (vert).
- c) un parcours sur le pourtour du lac (bleu) dans la limite proche de la profondeur 0,5-1 m.

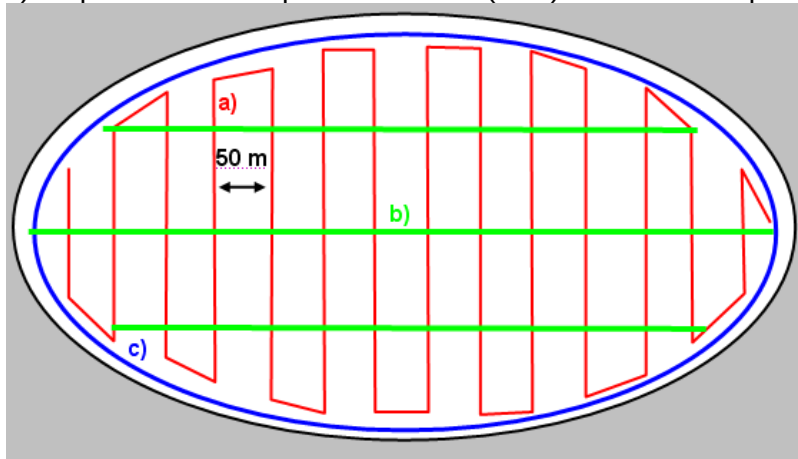


Figure 1 : Représentation schématisée du plan d'échantillonnage

La distance minimale entre deux points échantillonnés devra être d'environ 15 mètres sur les zones de faibles changements et d'environ 5 mètres sur les zones aux changements importants. Par conséquent, sur une zone de faible changement de relief, à une vitesse maximale de 20km/h, l'enregistrement automatique se fait sur un pas de temps régulier de 3 secondes. Dans les zones de changements brusques des profondeurs (bordures du lac, zone de crêtes), la vitesse est réduite entre 2 et 5 km/h afin de resserrer les points échantillonnés.

Ces paramètres seront ajustés en fonction du matériel (bateau, GPS-sondeur) et des conditions de terrain (relief, conditions météorologiques, règlements associés au plan d'eau ...).

Format de restitution du relevé bathymétrique

Données brutes sous fichier texte (séparateur « ; ») ou tableur (Excel, base de données), comprenant les champs (colonnes) suivant :

Nom_Plan_eau : Nom commun du plan d'eau

MS_CD : Code national de la masse d'eau (ex : DL23)

Date : Date du relevé bathymétrique

CoordonneeX : coordonnée projetée métrique X

CoordonneeY : coordonnée projetée métrique Y

CdProj : code Sandre de la projection (5 : Lambert 2 étendu ou 26 Lambert 93)

Profondeur : en mètres avec une précision décimétrique (0.1 m)

Cbat : côte NGF du plan d'eau en mètres, précision décimétrique (0.1 m)

Cref : côte de référence du plan d'eau.

CdIntervenant : Code Sandre de l'intervenant, si connu.

Points de rive

Des points GPS sont à prendre sur les berges du plan d'eau au niveau de la ligne d'eau c'est-à-dire au niveau du contact entre la terre et l'eau. Ils doivent être pris de façon régulière autour du plan d'eau. Par conséquent, il s'agit d'acquérir 8 points dans 8 directions cardinales. Nord (N), Nord-Est (NE), Est (E), Sud-Est (SE), Sud (S), Sud-Ouest (SO), Ouest (O), Nord-Ouest (NO) (Figure). Le choix de l'endroit à positionner se fait selon une meilleure répartition possible autour du plan d'eau et en fonction de l'accessibilité à la rive. L'acquisition du point (waypoint) se fait en utilisant un GPS classique en positionnant l'antenne à l'interface terre eau ou par tout autre technique de même précision. Les coordonnées X et Y sont à fournir dans le même système de projection que les relevés bathymétriques.

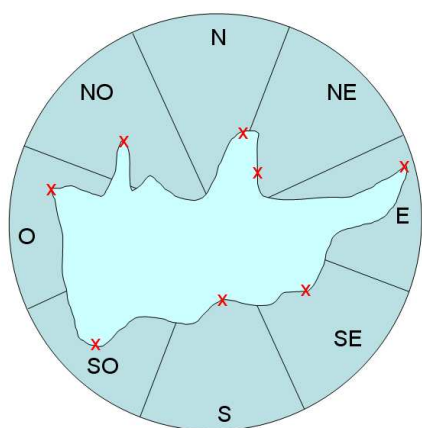


Figure 3 : Exemple de positionnement des points de rives selon les 8 directions cardinales.

Ces points de rive vont servir de points de contrôle pour recalibrer le pourtour du plan d'eau en fonction du niveau d'eau observé durant le relevé bathymétrique.

Format de restitution des points de rive

Données brutes sous fichier texte (séparateur « ; ») ou tableur (Excel, base de données), comprenant les champs (colonnes) suivant :

Nom_Plan_eau : Nom commun du plan d'eau

MS_CD : Code national de la masse d'eau (ex : DL23)

Date : Date du relevé bathymétrique

CoordonneeX : coordonnée projetée métrique X

CoordonneeY : coordonnée projetée métrique Y

CdProj : code Sandre de la projection (5 : Lambert 2 étendu ou 26 Lambert 93)

CdIntervenant : Code Sandre de l'intervenant, si connu.

La phase d'acquisition de terrain permet ainsi d'obtenir des points géoréférencés qui seront la base pour un post-traitement : interpolation des données et extraction des informations bathymétriques. La fin du document propose des descripteurs classiques tels que les profondeurs maximale, moyenne ou relative, les volumes ou des descripteurs plus avancés comme profondeur d'influence des vagues ou le développement hypsographique. Ces divers descripteurs permettent de mieux caractériser l'hydromorphologie des plan d'eau, sont utilisés dans modèles de stratification ou d'étude d'habitats de la faune lacustre.

Bathymétrie des plans d'eau*ALLEAUME S., LANOISELEE C., AGILLIER C.,***Corps du document****Introduction**

La bathymétrie est définie par la mesure de la profondeur d'un plan d'eau par sondage et traitement des données correspondantes en vue de déterminer la configuration du fond. C'est un facteur qui conditionne le fonctionnement et la qualité des écosystèmes lacustres (Ostendorp 2004). En effet, les caractéristiques morphologiques des lacs conditionnent le régime de stratification thermique et donc indirectement la circulation des eaux, des matières en suspension et des nutriments (Bragg et al. 2003, De Bortoli and Argillier 2006). La variation de la profondeur influence la disponibilité en habitats en agissant sur la surface relative de la zone littorale, la disponibilité en lumière ou encore sur le processus de stratification. Elle éclaire également sur la distribution des sédiments. Plus généralement, la bathymétrie contribue à appréhender les facteurs qui conditionnent la distribution des communautés aquatiques : profondeurs, pressions, températures, effets sur les courants...

C'est probablement pour toutes ces raisons que la directive cadre européenne sur l'eau définit l'état écologique d'un plan d'eau non seulement par les éléments biologiques et physico-chimiques mais aussi par leur état hydromorphologique (Communauté Européenne 2000).

Ainsi, les opérations de surveillance mises en place pour répondre à cette directive doivent viser à évaluer la qualité hydromorphologique c'est-à-dire le régime hydrologique et les conditions morphologiques. Les conditions morphologiques sont déclinées en trois éléments a) la structure de la rive, b) la variation de la profondeur du lac et c) la quantité, la structure et le substrat du lit. Les mesures bathymétriques permettent de répondre en partie aux éléments demandés sur les deux derniers points qui sont la profondeur et la structure du lit. La bathymétrie est donc un critère incontournable de la description de la morphologie des plans d'eau.

Au regard de cette demande, des études bathymétriques ont été initiées sur divers plans d'eau et par différents bureaux d'études. Les premiers retours de campagnes ont mis en évidence une grande disparité de qualités dans les relevés bathymétriques qui rend leur exploitation difficile au niveau national. Aucun protocole standardisé n'existait jusqu'à présent pour harmoniser les rendus bathymétriques. C'est donc dans cette optique de standardisation des procédures d'acquisition des données sur le terrain que le présent document a été réalisé. De plus, il s'agissait de proposer une méthode d'interpolation et de calcul de divers descripteurs pour expliquer le fonctionnement des systèmes et la variabilité des paramètres physico-chimiques et biologiques mesurés par ailleurs.

Conditions de réalisation

Ce protocole a été mis au point en intégrant les contraintes économiques, matérielles et temporelles inhérentes au travail à l'échelle d'un réseau national de la DCE.

La réalisation in situ du levé bathymétrique doit être suffisamment précise pour permettre de créer une carte bathymétrique représentant des isobathes au mètre près. De plus, il doit permettre l'extraction d'informations telles que la profondeur moyenne, la profondeur maximale, le volume, la forme de la cuvette, la surface de la zone littorale, etc., paramètres utilisés pour comprendre le fonctionnement des plans d'eau et expliquer la variation de la biologie et de la physico-chimie (typologie et modèles pressions/impacts).

De plus, la cartographie de la bathymétrie doit permettre la mise en place de l'échantillonnage pour le suivi des éléments biologiques (poissons). Au regard des objectifs visés, le niveau de précision proposé est décimétrique. En aucun cas ce type de relevé bathymétrique ne permet la réalisation d'une carte de navigation.

1. Principes de l'échosondage.

L'échosondage se définit comme une technique de mesure de la profondeur effectuée par un échosondeur, à partir des phénomènes de la réflexion d'ondes acoustiques. Un sondeur (boîtier) transmet une pulsion électrique à la sonde (immergée) qui, par cristal interne, la transforme en onde d'ultrasons. La vague d'ultrasons est envoyée vers le fond selon une fréquence prédéfinie : environ 200 KHz (Kilo Hertz) pour un sondage en eau douce et 50 KHz pour un sondage en mer. Lorsqu'elle rencontre le fond (ou tout autre obstacle), l'onde est réfléchiée et renvoyée vers la sonde. La vitesse de propagation de cette onde est d'environ 1500 m par seconde. Or, un sondeur peut mesurer des intervalles de temps inférieurs à un millième de seconde. Par conséquent, la différence de temps mesurée entre l'émission et la réception de l'onde permet de déterminer la distance parcourue par l'onde jusqu'au fond et donc d'en déduire une profondeur ponctuelle.

Les relevés bathymétriques géoréférencés sont réalisés à l'aide d'un échosondeur couplé à un système de positionnement par satellite (GPS). Ce couplage peut être issu d'un sondeur possédant un GPS intégré ou alors en reliant un échosondeur et un GPS. Le GPS permet de mesurer les coordonnées X et Y du point sondé, tandis que l'échosondeur fournit la valeur de la profondeur Z Z (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

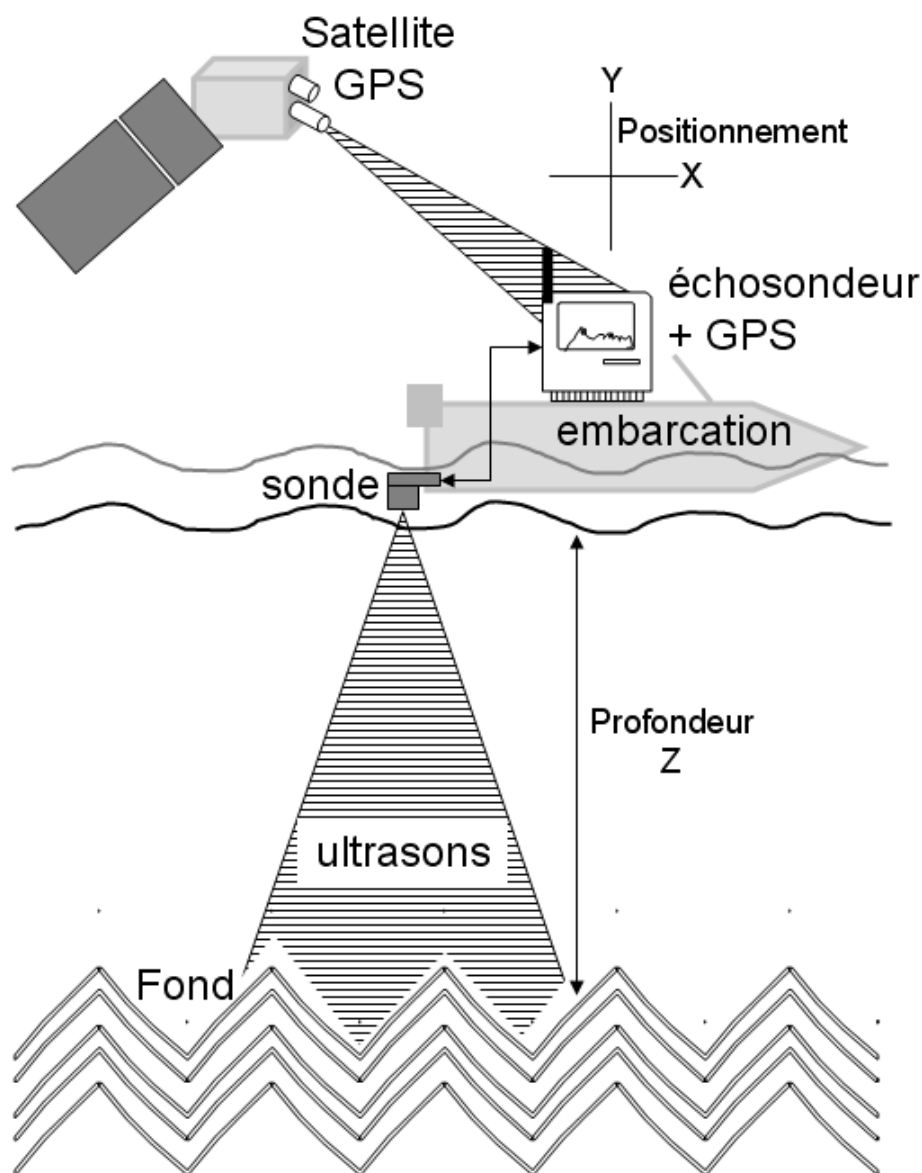


Figure 2 : Principe de l'échosondage couplé GPS

2. Méthode d'acquisition sur le terrain

Matériel : bateau, échosondeur GPS, GPS

Opérateurs : 2 personnes : un pilote, un technicien connaissant l'échosondeur.

Temps passé : une demi-journée à deux jours selon la taille du plan d'eau.

2.1. Matériel utilisé

L'échosondeur doit posséder au moins une sonde à fréquence proche de 200 KHz. En général les échosondeurs de pêches sont vendus avec des sondes double fréquence : 200 KHz pour l'eau douce et 50 KHz pour le sondage en mer. De plus, une sonde double largeur de faisceau est recommandée : Le grand angle ($>45^\circ$) est préconisé pour les plans d'eau peu profonds (<15 mètres), alors que le petit angle (10°) est plus pénétrant pour sonder les eaux profondes. Les profondeurs sont prises à la précision décimétrique

(0.1 mètre). Le GPS doit être de précision métrique. Ce matériel, doit pouvoir faire de l'acquisition automatique sur un pas de temps régulier.

2.2. Plan d'échantillonnage

Dans le cas d'un plan d'eau **naturel**, le levé bathymétrique doit être réalisé à une côte **supérieure** ou égale à la **côte moyenne annuelle**.

Dans le cas d'un plan d'eau **artificiel** le levé bathymétrique doit être réalisé à une côte **supérieure** ou égale à la **côte normale d'exploitation**.

Pour simplifier le discours, la côte moyenne annuelle et la côte normale d'exploitation sont désignées comme la **côte de référence**.

Les mesures sont à réaliser dans des conditions de vent faible afin d'éviter un effet de surcote localisé dû aux vagues.

2.2.1. Cotes du plan d'eau

Deux côtes altitudinales doivent être renseignées : la côte du plan d'eau au moment du relevé et la côte de référence.

1. La côte NGF du plan d'eau doit être renseignée pour la période de réalisation du relevé bathymétrique (**Cbat**). C'est un paramètre primordial pour les plans d'eau à fort marnage en termes d'amplitude et de fréquence. La côte du plan d'eau permet de transformer le niveau des eaux en une valeur altimétrique ramenée au niveau de la mer. Si la fréquence de marnage est très courte (journalière), la côte devra être prise à un pas de temps de même fréquence.

Le relevé de la côte se fait idéalement par lecture de l'échelle nivelée. Alternativement, on utilisera un altimètre de précision pour évaluer cette valeur. En cas de fréquence de marnage important, il peut être intéressant de récupérer les chroniques de niveau d'eau, auprès du gestionnaire.

2. Renseigner la côte de référence (**Cref**) NGF : côte moyenne annuelle pour un lac naturel ou la côte normale d'exploitation pour une retenue. Cette information servira pour la correction des valeurs de profondeurs à la côte de référence.

2.2.2. Relevé bathymétrique

Le levé bathymétrique comporte 3 trajets (**Figure 3**)

a) Une série de radiales en créneaux, perpendiculaires à la plus grande longueur du plan d'eau (rouge). Ces radiales seront espacées d'environ cinquante mètres et ramenées à cent mètres dans le cas des plans d'eau de grande taille (1000 ha).

b) Au moins 1 radiale centrale pour vérifier la qualité des mesures (vert).

c) un parcours sur le pourtour du lac (bleu) dans la limite proche de la profondeur 0,5-1 m.

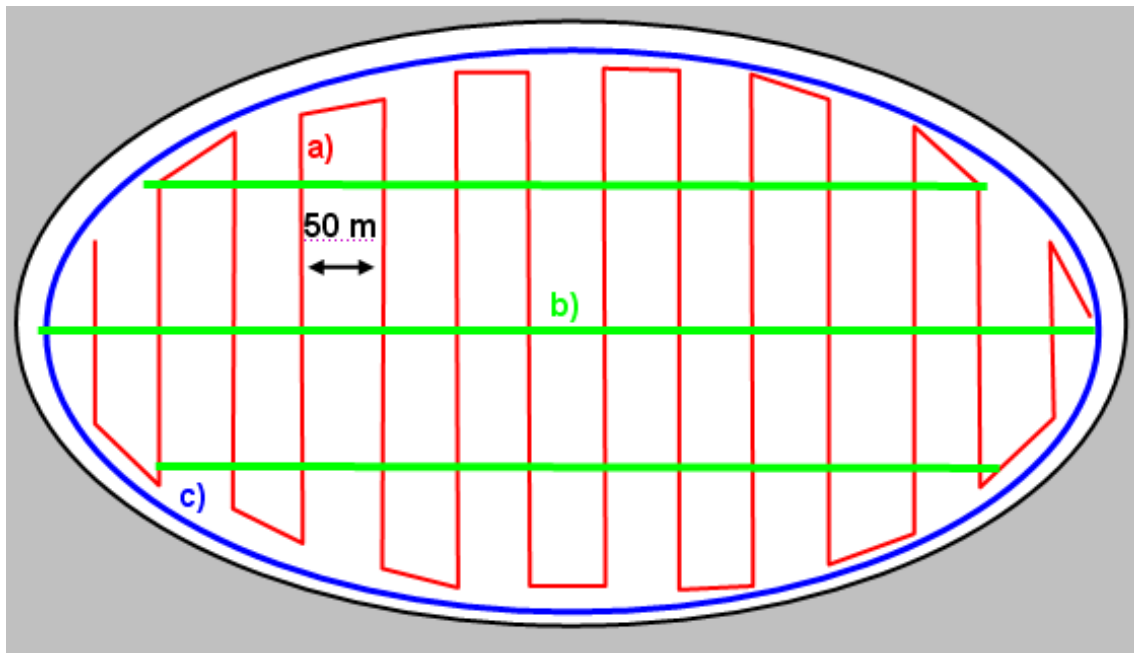


Figure 3 : Représentation schématique du plan d'échantillonnage

La distance minimale entre deux points échantillonnés devra être d'environ 15 mètres sur les zones de faibles changements et d'environ 5 mètres sur les zones aux changements importants. Par conséquent, sur une zone de faible changement de relief, à une vitesse maximale de 20km/h, l'enregistrement automatique se fait sur un pas de temps régulier de 3 secondes. Dans les zones de changements brusques des profondeurs (bordures du lac, zone de crêtes), la vitesse est réduite entre 2 et 5 km/h afin de resserrer les points échantillonnés (Figure 4).

Ces paramètres seront ajustés en fonction du matériel (bateau, GPS-sondeur) et des conditions de terrain (relief, conditions météorologiques, règlements associés au plan d'eau ...).

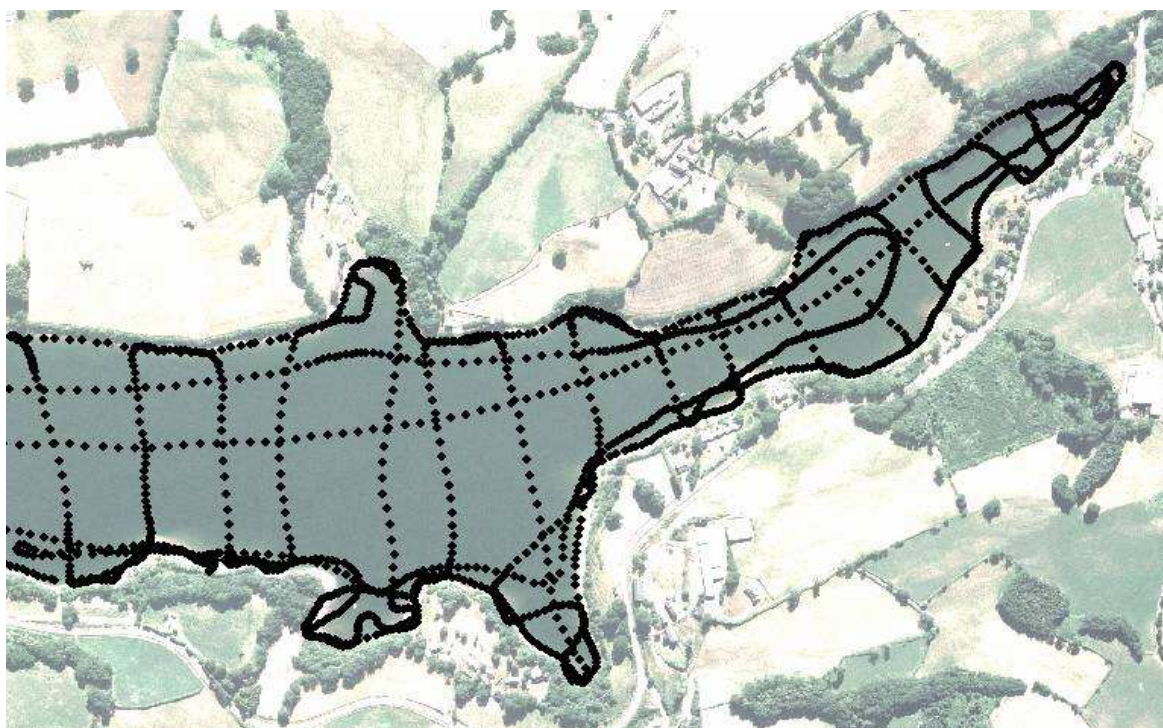


Figure 4 : Exemple d'échantillonnage bathymétrique

2.3. Format de restitution du relevé bathymétrique

Données brutes sous fichier texte (séparateur « ; ») ou tableur (Excel, base de données), comprenant les champs (colonnes) suivant :

Nom_Plan_eau : Nom commun du plan d'eau

MS_CD : Code national de la masse d'eau (ex : DL23)

Date : Date du relevé bathymétrique

CoordonneeX : coordonnée projetée métrique X

CoordonneeY : coordonnée projetée métrique Y

CdProj : code Sandre de la projection (5 : Lambert 2 étendu ou 26 Lambert 93)

Profondeur : en mètres avec une précision décimétrique (0.1 m)

Cbat : côte NGF du plan d'eau en mètres, précision décimétrique (0.1 m)

Cref : côte de référence du plan d'eau.

CdIntervenant : Code Sandre de l'intervenant, si connu.

2.4. Points de rive

Des points GPS sont à prendre sur les berges du plan d'eau au niveau de la ligne d'eau c'est-à-dire au niveau du contact entre la terre et l'eau. Ils doivent être pris de façon régulière autour du plan d'eau. Par conséquent, il s'agit d'acquérir 8 points dans 8 directions cardinales. Nord (N), Nord-Est (NE), Est (E), Sud-Est (SE), Sud (S), Sud-Ouest (SO), Ouest (O), Nord-Ouest (NO) (**Figure**). Le choix de l'endroit à positionner se fait selon une meilleure répartition possible autour du plan d'eau et en fonction de l'accessibilité à la rive. L'acquisition du point (waypoint) se fait en utilisant un GPS

classique en positionnant l'antenne à l'interface terre eau. Les coordonnées X et Y sont à fournir dans le même système de projection que les relevés bathymétriques.

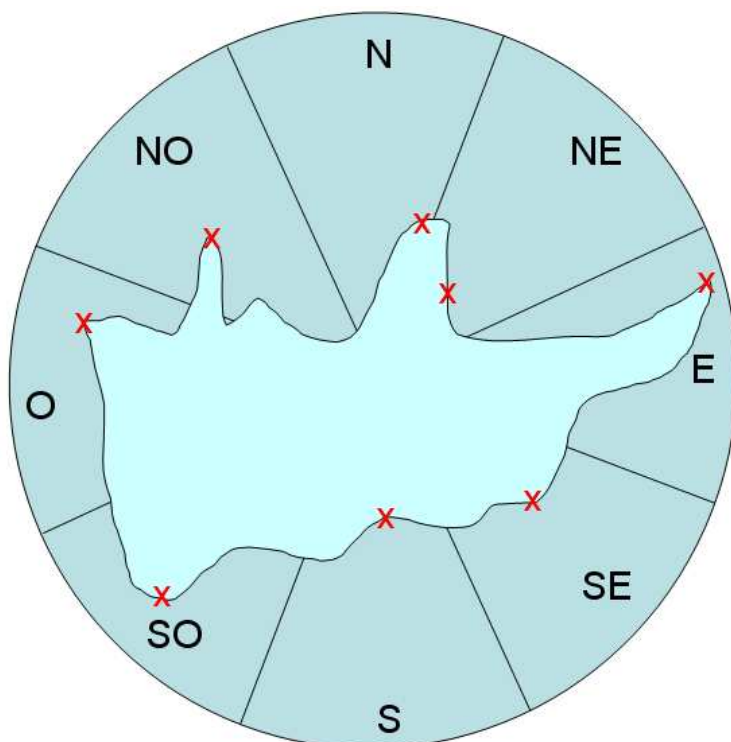


Figure 4: Exemple de positionnement des points de rives selon les 8 directions cardinales.

Ces points de rive vont servir de points de contrôle pour recaler le pourtour du plan d'eau en fonction du niveau d'eau observé durant le relevé bathymétrique.

2.5. Format de restitution des points de rive

Données brutes sous fichier texte (séparateur « ; ») ou tableur (Excel, base de données), comprenant les champs (colonnes) suivant :

Nom_Plan_eau : Nom commun du plan d'eau

MS_CD : Code national de la masse d'eau (ex : DL23)

Date : Date du relevé bathymétrique

CoordonneeX : coordonnée projetée métrique X

CoordonneeY : coordonnée projetée métrique Y

CdProj : code Sandre de la projection (5 : Lambert 2 étendu ou 26 Lambert 93)

CdIntervenant : Code Sandre de l'intervenant, si connu.

La phase d'acquisition de terrain permet ainsi d'obtenir des points géoréférencés qui seront la base pour un post-traitement : interpolation des données et extraction des informations bathymétriques (isobathes métriques).

3. Traitement des données

3.1. *Interpolation des données*

3.1.1. Principe de l'interpolation

L'interpolation est utilisée afin de généraliser les valeurs des profondeurs sur l'ensemble du plan d'eau.

Interpoler consiste à prédire les valeurs d'une variable en un point non échantillonné, à partir de points d'échantillonnages. Les méthodes d'interpolation se basent sur le principe que les valeurs des points proches spatialement ont des similarités plus importantes que les points éloignés.

Il existe de nombreuses méthodes d'interpolation. Elles se distinguent, surtout aux premiers abords, par la manière d'utiliser l'information collectée. Parmi ces techniques, nous en considérerons quatre :

- 1) la pondération par l'inverse de la distance
- 2) le krigeage.
- 3) les polynômes par morceaux ou splines,
- 4) les voisins naturels

3.1.1.1. *Pondération par l'inverse de la distance*

Encore appelée IDW (inverse distance weighting), cette méthode détermine les valeurs en calculant une moyenne pondérée à partir des valeurs des points du voisinage échantillonnés. La pondération est inversement proportionnelle à la distance séparant le centre de la cellule des points du voisinage. Les valeurs de sortie de la fonction IDW sont limitées par les valeurs utilisées pour faire l'interpolation. La fonction IDW est une moyenne et une moyenne ne peut pas être plus grande que la valeur la plus grande. Il est donc impossible de créer des crêtes ou vallées si les valeurs nécessaires ne sont pas présentes dans la donnée de départ. Un certain nombre de paramètres peuvent être pris en compte : le nombre de points de voisinage à utiliser, le rayon de recherche des points et la puissance, c'est-à-dire le poids accordé en fonction de la distance. Pour avoir un bon résultat il faut un échantillon suffisamment dense et ce en fonction des variations locales. Si les données d'entrée sont clairsemées ou inégales, le résultat obtenu ne sera pas vraiment représentatif.

3.1.1.2. *Krigeage :*

Le krigeage est une méthode d'interpolation issue de la géostatistique. Il se base sur le calcul, l'interprétation et la modélisation d'un variogramme qui est une appréciation graphique de la variance en fonction de la distance entre les données.

Le krigeage demande de se placer dans une hypothèse de stationnarité des données. Celle-ci implique, outre une moyenne égale en tout point, une stabilité de la covariance par translation. S'agissant de la bathymétrie d'un lac, cette hypothèse est difficilement acceptable. En effet, les éléments propres à la forme générale du lac débordent l'échelle même de l'étude. Il faudrait, en quelque sorte, une succession de lacs alentours pour pouvoir apprécier ces formes. Par conséquent, le krigeage n'est pas la méthode d'interpolation à privilégier.

3.1.1.3. *Spline*

Les méthodes polynomiales consistent à ajuster une surface aux points de mesure, à partir de fonctions appelées polynômes par morceaux ou splines. La méthode Spline peut donner des résultats incorrects lorsque les variations de profondeurs sont importantes sur une distance horizontale courte car elle peut se traduire par une surestimation ou une sous-estimation de la valeur interpolée en un point proche.

3.1.1.4. *Voisins naturels*

L'interpolation par les voisins naturels utilise la surface d'influence des points d'échantillonnages les plus proches comme facteur de pondération pour estimer la valeur à prédire. La surface d'influence est basée sur les polygones de voronoi (ou polygones de Thiessen) (Sibson 1981). Les polygones de voronoi sont formés autour de chaque point par les bissectrices perpendiculaires aux lignes reliant deux points voisins. La **Figure 5** illustre cette méthodologie. Un diagramme de voronoi est construit à partir des points observés (vert), puis un nouveau polygone de voronoi (beige) est créé autour du point d'interpolation (étoile rouge). La surface de chevauchement entre ce nouveau polygone et le diagramme initial sert de valeur de pondération.

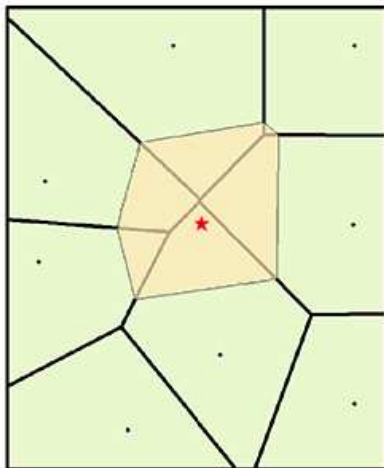


Figure 5 : Illustration de la méthode des voisins naturels

Les valeurs de sortie de la fonction « voisins naturels » sont limitées par les valeurs utilisées pour faire l'interpolation. Il est donc impossible de créer des crêtes ou vallées si les valeurs nécessaires ne sont pas présentes dans la donnée de départ. Aucun paramètre d'entrée n'est demandé ce qui en fait une méthode facilement utilisable. Cette méthode est efficace aussi bien pour des données distribuées régulièrement que pour des données irrégulières. De plus, cette méthode s'adapte bien aux données anisotropes comme c'est le cas ici (Watson 1992).

Pour ces raisons, cette méthode d'interpolation est à privilégier par rapport à l'échantillonnage envisagé.

D'autres méthodes d'interpolation existent et sont tout autant justifiables. Cependant, quelle que soient la méthode choisie, la qualité de l'interpolation dépendra essentiellement de la qualité de l'échantillonnage des bathymétries qui reste donc l'étape cruciale.

3.1.2. Enveloppe pour l'interpolation

Le pourtour du plan d'eau est à inclure au moment de l'interpolation, ceci pour deux raisons.

- Il s'agit de contraindre l'interpolation dans l'espace occupé uniquement par la masse d'eau
- Les lignes de rives doivent permettre de fixer le niveau de profondeur zéro.

Il existe bien souvent une différence entre le niveau d'eau au moment du relevé bathymétrique et celui que l'on trouve dans les bases de données spatiales. Idéalement, il faudrait une photographie aérienne géoréférencée du plan d'eau au moment de l'échantillonnage afin de redessiner les lignes de rive. Ceci est difficilement envisageable, ne serait-ce que par l'augmentation du coût. Prendre le contour en faisant le tour du plan d'eau avec un GPS n'est pas plus réaliste du fait de l'inaccessibilité de certaines zones (marécages, envasement, herbiers ...).

La méthode envisagée est le recalage du pourtour du plan d'eau issu des données spatiales par l'utilisation de points de rives positionnées au GPS. Le pourtour du plan d'eau subi un réajustement spatial.

Par la suite, cette couche est transformée en une couche de points dont la profondeur est mise à zéro. Dans le cas des barrages, les profondeurs prennent la valeur du point échantillonné le plus proche (et non pas à zéro, ce qui pourrait entraîner des biais dans l'interpolation). Ces points de contours sont ajoutés aux points d'échantillonnages pour participer à l'interpolation de l'ensemble du plan d'eau.

3.2. Correction des valeurs de profondeur

Par souci de standardisation, les valeurs de profondeurs et de volumes doivent être exprimées à la cote de référence.

Par conséquent, connaissant la cote à laquelle s'est effectué le relevé bathymétrique (Cbat) et la cote de référence (Cref), il est possible de corriger les valeurs de profondeur interpolées. Selon le protocole, Cbat est toujours supérieure à Cref.

$$P_{corr} = P_{ech} - (C_{bat} - C_{ref})$$

P_{corr} : Profondeur corrigée

P_{ech} : Profondeur échantillonnée

Puis, les valeurs négatives peuvent être supprimées, puisqu'elles correspondent aux données supérieures à la cote de référence. Il est maintenant possible d'extraire les descripteurs morphologiques aux cotes de référence.

4. Extraction des descripteurs morphologiques

L'interpolation des données bathymétriques étant réalisée, il est possible d'extraire de nouvelles informations sur les caractéristiques de la cuvette. Ces informations sont fondamentales pour la compréhension du fonctionnement des plans d'eau. Les principaux indicateurs morphologiques sont donnés dans la norme européenne prEN 16039 (C.E.N. 2010), le guide pour l'évaluation des caractéristiques hydromorphologiques des lacs. Ces derniers sont issus essentiellement des travaux d'Hakanson (Hakanson 1996, 2005b, 2005a). Le code des indicateurs est maintenu dans la version anglaise pour conserver cette référence à la norme européenne.

Profondeur maximale (Dmax) - Maximum depth

Hauteur d'eau au point de plus grande profondeur à la côte de référence du plan d'eau.

Profondeur moyenne (Dmv) - Mean depth

Hauteur moyenne des eaux à la côte de référence du plan d'eau après interpolation des valeurs de profondeur. Cette valeur est exprimée en mètre.

Volume (V)

Volume du plan d'eau exprimé en km³. Il s'agit de la quantité totale d'eau présente dans la cuvette à la côte de référence. Le volume peut être calculé par state de profondeur.

Profondeur relative (Drel) - Relative depth

Rapport entre la profondeur maximale et le diamètre moyen du plan d'eau. La profondeur relative peut être utilisée pour décrire la stabilité de stratification d'un lac. Les plans d'eau petits et profonds présentent un Drel important.

$$Drel = \frac{D_{max} * \sqrt{\pi}}{20 * \sqrt{A}}$$

Où A est la surface du plan d'eau en km².

Profondeur d'influence des vagues - Depth of wave base

Cette valeur correspond à la profondeur maximale d'influence de l'énergie des vagues sur les sédiments de fonds pour une surface de plan d'eau (Hakanson 2005b).

L'information sur la remise en suspension des sédiments et donc sur l

Ce paramètre doit servir à mieux décrire une partie du phénomène de remise en suspension des sédiments qui peut avoir des effets sur la physico-chimie du plan d'eau, la chaîne trophique ou encore la répartition de la faune macrobenthique.

$$Dwb = \frac{(45.7 * \sqrt{A})}{(21.4 + \sqrt{A})}$$

Où A est la surface du plan d'eau en km²

Rapport dynamique (Dr) - *Dynamic ratio*

Rapport entre la surface et la profondeur moyenne. Cette valeur exprime le brassage dans le plan d'eau : plus le lac est grand et peu profond, plus cette valeur est importante (Hakanson 2005b).

$$Dr = \frac{\sqrt{A}}{D_{mv}}$$

Où A est la surface du plan d'eau en km² et D_{mv} est la profondeur moyenne.

Développement du volume (Vd) - *Volume development*

Rapport entre le volume du plan d'eau et le volume d'un cône dont la surface basale est égale à la surface du lac et la hauteur est égale à la profondeur maximale. Cette mesure exprime un indice de forme de la cuvette. Valeur sans dimension.

$$Vd = \frac{3 * D_m}{D_{max}}$$

Ainsi, un Vd inférieur à un indique une forme plutôt convexe, tandis qu'un Vd supérieur à un indiquera une forme concave (Figure 6).

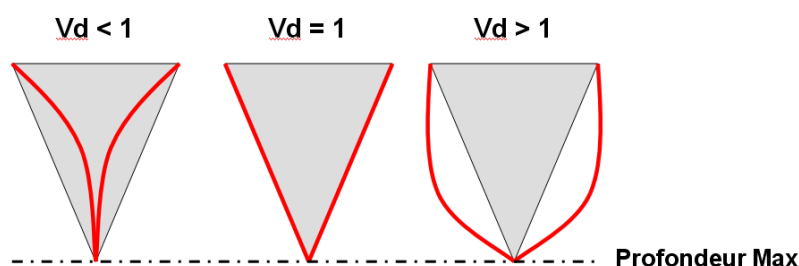


Figure 6 : Illustration du Vd : en gris le cône théorique, en rouge la forme du bassin.

Développement hypsographique (Hd) – *Hypsographic development*

Cette mesure développée par Johansson et al. (2007) est une amélioration du paramètre Vd. Il s'agit du rapport entre le volume du plan d'eau et le volume d'un corps géométrique dont le volume, la surface et la profondeur maximale sont égales à celles du plan d'eau. Il est directement calculé à partir de Vd. La démarche et la série d'équations permettant le calcul du Hd sont donnés par Johansson et al. (2007).

Courbe hypsographique relative

Cette courbe représente la surface cumulée en fonction des profondeurs cumulées (Hakanson 2005b). Elle est encore appelée courbe profondeur-surface. Cette courbe fournit une indication sur la forme de la cuvette (Figure 7).

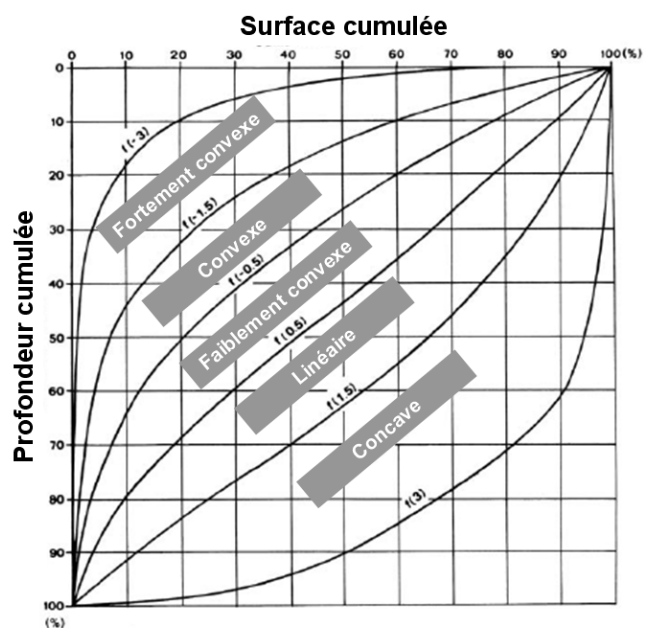


Figure 7 : Courbes hypsographiques

Remerciement

Les auteurs remercient Patrice BRETEL (Ingénieur d'étude - Docteur, équipe Morphodynamique Continentale et Côtière, Université de Caen) pour ses conseils et remarques lors de la mise au point de ce protocole.

Bibliographie

- Bragg, O. M., R. W. Duck, J. S. Rowan, and A. R. Black. 2003. Review of methods for assessing the hydromorphology of lakes. SNIFFER Report Environment Agency, University of Dundee.
- C.E.N. 2010. Water quality - Guidance standard on assessing the hydromorphological features of lakes. Pages 35 *in*.
- Communauté Européenne. 2000. Directive 2000/60/CE du Parlement Européen et du Conseil du 23 octobre 2000. Journal Officiel des Communautés Européennes **L327**.
- De Bortoli, J., and C. Argillier. 2006. Hydromorphologie lacustre, mesure de son altération et réponses biologiques - Etude bibliographique. Rapport d'étude Cemagref, Montpellier.
- Hakanson, L. 1996. Predicting important lake habitat variables from maps using modern modelling tools. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences **53**:364-382.
- Hakanson, L. 2005a. The importance of lake morphometry and catchment characteristics in limnology - ranking based on statistical analyses. Hydrobiologia **541**:117-137.
- Hakanson, L. 2005b. The importance of lake morphometry for the structure and function of lakes. International Review of Hydrobiology **90**:433-461.
- Johansson, H., A. A. Brolin, and L. Hakanson. 2007. New approaches to the modelling of lake basin morphometry. Environmental Modeling & Assessment **12**:213-228.
- Ostendorp, W. 2004. New approaches to integrated quality assessment of lakeshores. Limnologica **34**:160-166.
- Sibson, R. 1981. A Brief Description of Natural Neighbor Interpolation. Pages 21-36 *in* J. W. Sons, editor. Interpolating multivariate data, New York.
- Watson, D. F. 1992. Contouring: a guide to the analysis and display of spatial data. Pergamon Press, Oxford.

Onema
Hall C – Le Nadar
5 square Félix Nadar
94300 Vincennes
01 45 14 36 00
www.onema.fr

Cemagref
Parc de Tourvoie
BP 44,
92163 Antony cedex
01 40 96 61 21
www.cemagref.fr