Mise en place d'un réseau de suivi thermique lacustre à l'échelle nationale : Phase de test

D. Rebiere, P.A. Danis, Martin Daufresne, T. Peroux, J.M. Baudoin

▶ **To cite this version:**

D. Rebiere, P.A. Danis, Martin Daufresne, T. Peroux, J.M. Baudoin. Mise en place d'un réseau de suivi thermique lacustre à l'échelle nationale : Phase de test. irstea. 2013, pp.65. hal-02599804

HAL Id: hal-02599804
https://hal.inrae.fr/hal-02599804

Submitted on 16 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.

Partenariat 2013
Réseau thermie

Mise en place d'un réseau de suivi thermique lacustre à l'échelle nationale : Phase de test

Rapport d'étape 2013

Delphine REBIERE, Pierre-Alain DANIS, Martin DAUFRESNE, Tiphaine PEROUX, Jean-Marc BAUDOIN

Avec la contribution de Emmanuelle BLAIN, Jean-Michel FOISSY, Philippe MOULLEC, Gaël OLIVIER, Thierry POINT, Jean-Claude RAYMOND, Sylvain RICHARD, William SREMSKY, Baptiste TESTI et des SD 05/83/38

Les auteurs

Delphine REBIERE
1- Irstea, Pôle *Onema-Irstea Hydroécologie des plans d'eau,* F-13100 Aix-en-Provence, France
2- Onema, Pôle *Onema-Irstea,Hydroécologie des plans d'eau* - F- 94300, Vincennes, France

Pierre-Alain DANIS
1- Irstea, Pôle *Onema-Irstea Hydroécologie des plans d'eau,* F-13100 Aix-en-Provence, France
2- Onema, Pôle *Onema-Irstea,Hydroécologie des plans d'eau* - F- 94300, Vincennes, France

Martin DAUFRESNE
1- Irstea, Pôle *Onema-Irstea Hydroécologie des plans d'eau,* F-13100 Aix-en-Provence, France
2- Onema, Pôle *Onema-Irstea,Hydroécologie des plans d'eau* - F- 94300, Vincennes, France

Tiphaine PEROUX
1- Irstea, Pôle *Onema-Irstea Hydroécologie des plans d'eau,* F-13100 Aix-en-Provence, France
2- Onema, Pôle *Onema-Irstea,Hydroécologie des plans d'eau* - F- 94300, Vincennes, France

Jen-Marc BAUDOIN
1- Irstea, Pôle *Onema-Irstea Hydroécologie des plans d'eau,* F-13100 Aix-en-Provence, France
2- Onema, Pôle *Onema-Irstea,Hydroécologie des plans d'eau* - F- 94300, Vincennes, France

Les contributeurs

Emmanuelle BLAIN
Irstea, UR HYAX, F-13100 Aix-en-Provence, France

Jean-Michel FOISSY
Onema, DIR Méditerranée, Unité connaissance d'Aix en Provence, F-13547 Aix-en-Provence, France

Philippe MOULLEC
Onema, SD des Hautes-Alpes, F **-** 05200 Embrun, France

Gaël OLIVIER
Onema, DIR Auvergne-Limousin, F -63370 Lempdes, France

Thierry POINT
1- Irstea, Pôle *Onema-Irstea Hydroécologie des plans d'eau,* F-13100 Aix-en-Provence, France
2- Onema, Pôle *Onema-Irstea,Hydroécologie des plans d'eau* - F- 94300, Vincennes, France

Jean-Claude RAYMOND
Onema, Unité spécialisée milieux lacustres, F - 74200 Thonon-les-Bains, France

Sylvain RICHARD
Onema, DIR Méditerranée, F - 34790 Grabels, France

William SREMSKY
Onema, DIR Auvergne-Limousin, F - 63370 Lempdes, France

Baptiste TESTI
Irstea, UR HYAX, F-13100 Aix-en-Provence, France

Les correspondants

Samuel DEMBSKY
Onema, DCIE, F - 94300 Vincennes, France

Jen-Marc BAUDOIN
1- Irstea, Pôle *Onema-Irstea Hydroécologie des plans d'eau,* F-13100 Aix-en-Provence, France
2- Onema, Pôle *Onema-Irstea,Hydroécologie des plans d'eau* - F- 94300, Vincennes, France

Droits d'usage :	*accès libre*
Couverture géographique :	*national*
Niveau géographique :	France
Niveau de lecture:	*Professionnels, experts*
Nature de la ressource :	*Document*

Mise en place d'un réseau de suivi thermique lacustre à l'échelle nationale :
Phase de test
Rapport d'étape

Sommaire

ABREVIATIONS **5**

RESUME **6**

ABSTRACT **6**

INTRODUCTION **7**

1ERE PARTIE : DEPLOIEMENT DE LA PHASE DE TEST **8**

1.1. SELECTION DES SITES PILOTES 8
1.2. CONTRAINTES LIEES A LA MISE EN PLACE DU RESEAU 10
1.3. PROTOCOLE DE MESURE 11
1.4. APPAREILLAGE DE MESURE 12
1.4.1. Enregistreur de température *12*
1.4.2. Enregistreur de niveau d'eau *12*
1.4.3. Préparation des enregistreurs *13*
1.5. SOLUTIONS DE MOUILLAGE : DE LA REALISATION A LA RECUPERATION DES DONNEES 15
1.5.1 Matériels nécessaires au montage des solutions de mouillage *15*
1.5.2. Description des mouillages pour les enregistreurs de température et de leur montage *16*
1.5.3. Description du mouillage du capteur de pression et de son montage *24*
1.5.4. Installation des mouillages *26*
1.5.5. Récupération des données *27*
1.6. EVALUATION DES COUTS D'INVESTISSEMENT 27
1.6.1. Coûts matériels *27*
1.6.2. Coûts logistiques *28*
1.6.3. Estimation des coûts globaux *28*

2 EME PARTIE : PRE-TRAITEMENT DES DONNEES RECOLTEES **29**

2.1. ETAPE 1 : STOCKAGE DES DONNEES BRUTES 29
2.2. ETAPE 2 : CONTROLE DES DONNEES 30
2.3. ETAPE 3 : STOCKAGE DES DONNEES VALIDEES 30
2.3.1. Architecture de la base *30*
2.3.2. Description des données de température *34*
2.4. VISUALISATION DES PREMIERES DONNEES : EXEMPLE SUR LE LAC DE SAINTE CROIX 34

3EME PARTIE : PERSPECTIVES (2014-2015) **35**

3.1. BILAN DE LA PHASE DE TEST 35
3.2. CHOIX DU PAS DE TEMPS D'ENREGISTREMENT DES MESURES ET DE LA REPARTITION SPATIALE DES SONDES 35
3.3. EVALUATION DE LA REPRESENTATIVITE DU PROFIL EN CONTINU PAR RAPPORT A L'ENSEMBLE DE LA MASSE D'EAU : CAS DE LA RETENUE DE BIMONT 36

CONCLUSION **40**

BIBLIOGRAPHIE **41**

ANNEXES **43**

Abréviations

Abréviations	Définition
DAST	Direction de l'Action Scientifique et Technique (ONEMA)
DCIE	Direction de la Connaissance et de l'Information sur l'Eau (ONEMA)
DDT	Direction Départementale des Territoires
Dir	Délégation interrégionale (ONEMA)
Dpt	Département
Hb	Hauteur de la bouée (m)
Hbe	Hauteur de la bouée avec étrier de selle (m)
Irstea	Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture
LN	Lac naturel
Mmax	Amplitude maximale du marnage observé (m)
NGF	Nivellement Général de la France
ONEMA	Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques
Phypo	Profondeur de l'hypolimnion (m)
Pmax	Profondeur maximale du lac (m)
Ppose	Profondeur de pose du mouillage thermie (m)
Ppres	Profondeur de pose du capteur de pression (m)
R	Retenue
SANDRE	Service d'Administration Nationale des Données et Référentiels sur l'Eau
SD	Service Départemental (ONEMA)

Résumé

Ce rapport présente le cahier des charges suivi lors de la phase de test de la faisabilité d'un réseau de mesures thermiques en plan d'eau à l'échelle nationale. Ce document est dans sa première partie un support technique pour la réalisation de solutions de mouillage d'enregistreurs de température (protocole, montage, coût…).

Dans une seconde partie, le schéma conceptuel du pré-traitement des données est exposé : du stockage des données brutes à l'archivage dans une base spécifique. De plus, un graphique des premières données recueillies sur le lac de Sainte Croix (04/83) y est présenté.

La dernière partie expose des propositions de perspectives à cette phase de test à une échéance à court terme (bilan du matériel, ajustement des intervalles de mesures et de la position des sondes le long des mouillages, lancement du réseau à large échelle).

Abstract

This report presents the specifications followed during the test phase to test the feasibility of a network of thermal measurements in water level nationally. This document is intended as a support for the realization of fountain solution temperature recorders (protocol, assembly, cost ...).

In the second part, the conceptual diagram of the pre-processing of data is exposed: storage of raw data archiving in a specific database. In addition, a graph of raw data collected on Lake Sainte Croix (04/83) is presented.

The last section focuses on exposing potential prospects this testing phase to a short-term maturity (balance equipment, interval adjustment measures and the position of the probes along the moorings, launch the network on a large scale).

Introduction

Le changement climatique est à l'origine d'importantes modifications des écosystèmes à l'échelle mondiale, et notamment de la température des systèmes aquatiques (Adrian et al., 2009; Livingstone, 2008). Or, la température est un déterminant essentiel de la dynamique des masses d'eau dans les plans d'eau, dynamique qui conditionne leurs fonctionnements tant chimique que biologique (Boehrer and Schultze, 2008; Pourriot and Meybeck, 1995). En effet, les lacs sont soumis à des périodes de stratifications thermiques créant, du fait de la relation densité-température de l'eau douce (Heggen, 1983), une barrière pour le transfert vertical des espèces chimiques (oxygénation des eaux de fonds, relargage des nutriments) et pour certains organismes. Cependant, l'étude des impacts du réchauffement climatique sur les systèmes lacustres nécessite encore un certain nombre de développements.

Selon certaines études, les conséquences du changement climatique se traduiraient par une hausse des températures de l'épilimnion notamment en été, une période de stratification plus longue et plus stable, des mélanges complets hivernaux moins systématiques et des périodes d'englacement plus courtes. Les résultats sont semblables entre les études qu'elles soient basées sur des données historiques (Livingstone, 2003) ou sur des simulations (Bayer et al., 2013; DeStasio et al., 1996; Sahoo et al., 2011). Ainsi les lacs ne sont pas des systèmes stationnaires, mais évoluent selon les variables météorologiques. Par conséquent, les lacs sont amenés à changer de fonctionnement thermodynamique au cours du temps (Livingstone, 2008). La diminution des mélanges complets va entrainer des diminutions létales du taux d'oxygénation des eaux profondes. Cela peut entrainer la formation d'une zone d'hypoxie à l'interface eau/sédiment favorisant, par exemple, la solubilisation du phosphore et des métaux lourds des sédiments (Sahoo et al., 2011). De plus, l'augmentation de la température augmente les activités microbiennes et les processus de dénitrification, induisant ou exacerbant la dégradation de la qualité de l'eau (Sahoo et al., 2011).

C'est dans ce contexte que l'ONEMA, organisme public, porte une attention particulière à l'impact de l'augmentation des températures des systèmes aquatiques. De ce fait, il est l'instigateur de la mise en place d'une surveillance à long terme et en continue de la température des plans d'eau car il est essentiel de disposer de données à haute fréquence pour comprendre et modéliser les changements de régime (Livingstone, 2008). La création de ce réseau est menée en partenariat avec l'Irstea au sein du Pôle « Hydro-écologie des Plans d'Eau » à Aix-en-Provence, afin de mutualiser les compétences des deux établissements. Le réseau apportera un outil de mesure tant au service des gestionnaires que des scientifiques.

La création de ce réseau a de multiples objectifs :

- affiner la connaissance du fonctionnement thermodynamique des plans d'eau nationaux en fonction des contextes environnementaux locaux (morphologie, météorologie, pressions anthropiques...);
- identifier les plans d'eau aux fonctionnements thermodynamiques instables ;
- anticiper des évolutions futures des fonctionnements thermodynamiques des plans d'eau (e.g. anoxie hypolimnique prolongée), prévenir leur impact sur la qualité de l'eau et des écosystèmes ;
- intégrer ces évolutions dans les outils DCE de bioindication de l'état écologique des plans d'eau ;
- appuyer les stratégies d'adaptation des modes de gestion (gestion de la ressource piscicole, gestion de l'eau potable, gestion d'hydro-électricité) pour limiter les effets négatifs du changement climatique ;
- quantifier les effets des changements climatiques globaux dans le choix des mesures de restauration et dans l'analyse de leur efficacité durable.

Avant la mise en place de manière pérenne du réseau de suivi de température, il est nécessaire d'éprouver la robustesse des solutions techniques choisies et les contraintes logistiques sur quelques sites courant 2013. Ce travail est présenté dans la première partie de ce rapport ainsi que le déroulement de la

phase de test. La seconde partie du rapport s'attache à décrire le processus de récupération, validation et de stockage des données. La troisième partie est consacrée aux perspectives envisagées à l'issue de la phase de test à différentes échéances.

1ère partie : Déploiement de la phase de test

1.1. Sélection des sites pilotes

Cette phase fait suite à un premier cahier des charges élaboré en 2010 (Rondel et al., 2011) et vise à éprouver courant 2013 la robustesse des solutions techniques de mesures et les contraintes logistiques de la mise en route du réseau. La sélection des 9 lacs équipés (Tableau 1, Figure 1) repose sur (i) leur diversité en termes de conditions environnementales, (ii) leurs contraintes techniques (marnage, gel, vent, forte fréquentation touristique, accessibilité), (iii) leur appartenance à des réseaux existants (RCS, RCO …) et (iv) leur proximité avec les délégations interrégionales de l'ONEMA impliquées dans cette phase (Rhône-Alpes, Auvergne-Limousin et Méditerranée) et le Pôle d'étude et de recherche ONEMA-Irstea « Hydro-écologie des Plans d'Eau ». Sur certains plans d'eau, d'autres partenaires sont associées tels que la Fédération de Pêche et de Protection du Milieu Aquatique du Var (Sainte Croix) et le réseau des lacs sentinelles (Pavé, Lauzanier et Malrif).

Tableau 1. Caractéristiques des 9 lacs proposés comme sites pilotes lors de la phase test

Lac	Dir	Dpt	Type	Surface (km²)	Pmax (m)	Altitude (m)	Marnage (m)	Aléas environnementaux
Aulnes	8	13	LN	0.87	5.5	11	0.6	vent
Bimont	8	13	R	1.19	55	330	23	marnage, vent
Pierre-Châtel	5	38	LN	0.97	10.3	923	0.2	gel, vent
Pavin	6	63	LN	0.45	96	1196	0.5	gel, navigation
Salagou	8	34	R	7.28	51.5	139	4.22	marnage, vent, activités récréatives
Sainte-Croix	8	04/83	R	21.99	83	477	16	marnage, activités récréatives
Malrif	8	05	LN	0.055	33	2579	NA	gel, attrait paysager
Lauzanier	8	04	LN	0.0031	7.5	2284	NA	gel, attrait paysager
Pavé	8	05	LN	0.11	53	2846	NA	gel, attrait paysager

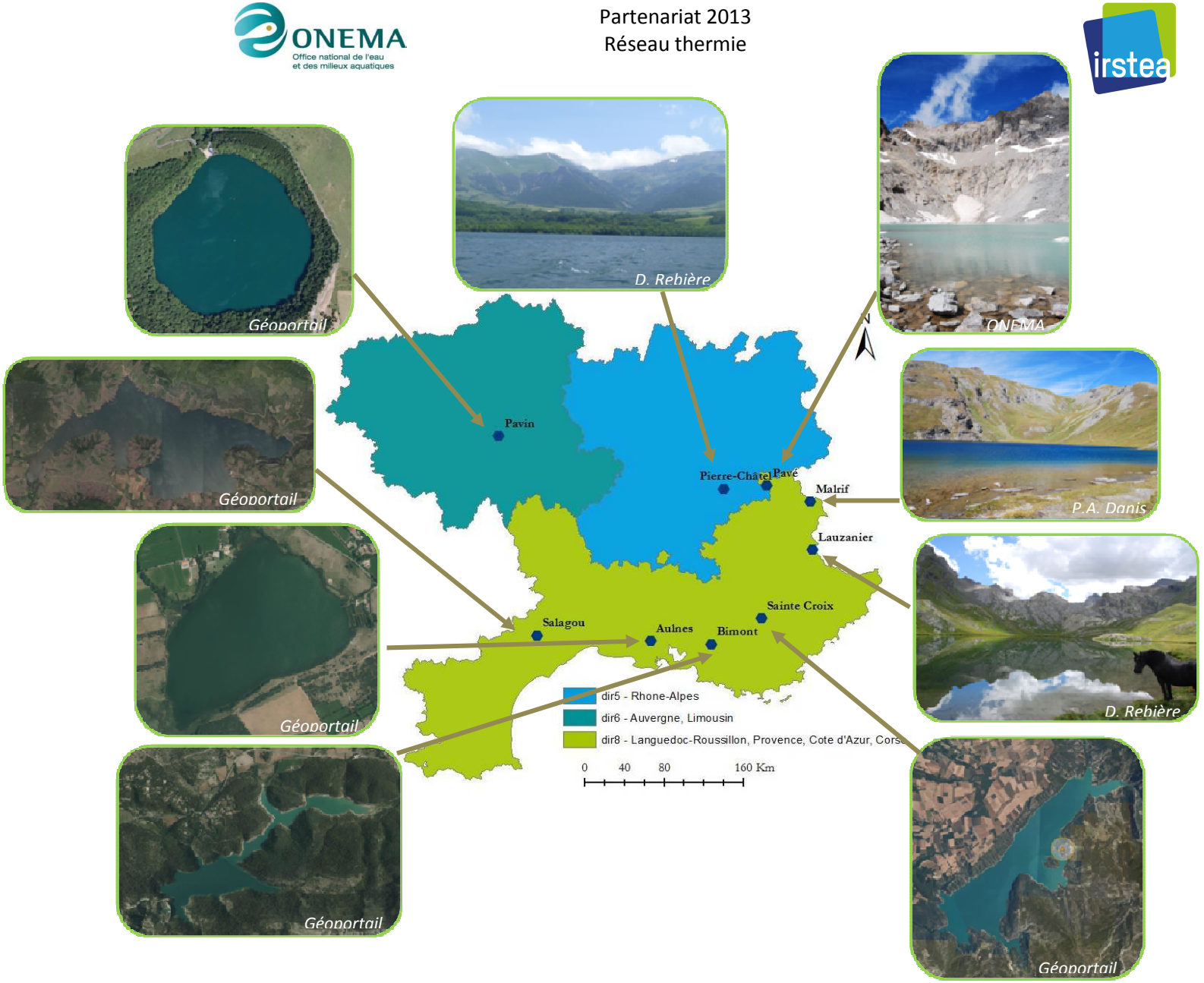


Figure 1. Localisation des sites pilote au sein des délégations interrégionales de l'ONEMA impliquées dans la phase test

1.2. Contraintes liées à la mise en place du réseau

Il existe 2 types de contraintes : celles environnementales dont les risques associés ainsi que les solutions possibles sont détaillés dans le Tableau 2, et celles liées à l'organisation du réseau. Il est essentiel de toutes les identifier pour adapter au mieux les mouillages.

Tableau 2. Synthèse des principales contraintes rencontrées lors de la mise en place du réseau de température d'après Rondel et al. 2010

	Aléas/opération	Contraintes	Risques	Solutions envisageables
Environnement	Vent	submersion de la bouée	perte du matériel et des données	bouée insubmersible
		oscillations horizontales	incertitude sur la position des capteurs câbles emmêlés	corps mort assez lourd, câbles rigides émerillon pour relier le câble au corps mort
	Marnage	oscillations verticales	incertitude sur la position des capteurs de température	capteur de pression chaine dont la longueur est au moins égale au marnage maximal observé
	Gel	difficultés d'accès	perte de données	capacité de stockage des données adaptée
		oscillations horizontales lors du dégel	incertitude sur la position des capteurs câbles emmêlés rupture du mouillage (perte des données)	résistance des éléments du mouillage adaptée émerillon pour relier le câble au corps mort
		pression de la glace	matériel brisé	résistance du matériel adapté, surplus
	Activités récréatives (navigation, baignade, pêche…)	forte fréquentation	vandalisme (perte des données)	sensibilisation des usagers et gestionnaires, bouée visible, câble avec sondes attachées à la bouée avec 1 cadenas, outils adaptés pour couper les éléments du mouillage
		sécurité des personnes	mise en danger des personnes	bouée visible, information des usagers
		attrait paysager	dégradation visuelle du site	mouillage en sub-surface (si pas d'activités sur le lac)
	Accessibilité au site	accéder à pied	poids du matériel trop lourds passage difficile	alléger au maximum le mouillage séparer les diverses composantes du mouillage héliportage ou transport par animaux
		utilisation bateau gonflable	stabilité et poids maximum autorisé faible	alléger au maximum le mouillage, équipement de sécurité
Organisation / logistique	Réalisation du mouillage	technicité minimale	assemblage long et fastidieux	assemblage par 1/2 personnes, montage sur 1 journée
	Mise à l'eau	transport facile	difficultés de manutention	masse du mouillage < 30 kg, 2/3 personnes requises
	Relevage du mouillage	manipulation sans aide mécanique	impossibilité de remonter le corps mort/difficulté de manutention pas de repérage du mouillage	sondes sur câble indépendant du corps mort
		repérage du mouillage	pas de repérage	coordonnées GPS lors de la pose, bouée de couleur visible
	Récupération des données	stockage	erreurs de manipulations	déchargement in situ avec ordinateur pour un contrôle en direct formation du personnel, logiciel simple d'utilisation
		entretien	matériel usagé	prévoir du matériel supplémentaire, échange des pièces in situ évaluation de l'état des sondes avec logiciel
			déviance des mesures	profils avec sonde manuelle en parallèle test de la dérive instrumentale régulier

1.3. Protocole de mesure

Le réseau a pour objectif de suivre la température en continue sur l'année et sur l'ensemble de la colonne d'eau. La profondeur maximale (Pmax) du lac détermine le nombre d'enregistreurs à installer :

- Si Pmax < 10 m: à partir de 0,5 m sous la surface, puis tous les mètres jusqu'au fond du lac ;

- Si Pmax ≥ 10 m: à partir de 0,5 m sous la surface, puis tous les mètres jusqu'à l'hypolimnion et enfin tous les 4 m jusqu'au fond du lac ;

La profondeur de l'hypolimnion (Phypo) est évaluée théoriquement si l'on ne dispose pas de profils selon la formule :

$$Phypo = \left(\frac{Pmax - Dcrit}{2}\right)$$

où

$$Dcrit = \frac{45{,}7 * Surface^{0,5}}{21{,}4 + Surface^{0,5}}$$

avec la surface exprimée en kilomètres carrés et les profondeurs de l'hypolimnion et maximale du plan d'eau exprimées en mètres (*Hakanson et al., 2004*).

Une macro *Excel*, développée par Yann Le Coarer et Jérémy Beguin (unité HYAX, Irstea), permet de connaitre précisément la hauteur d'enfoncement de la bouée, facilitant la fixation du premier enregistreur à 50 cm sous la surface. Cette macro n'est valable que pour les bouées de surface utilisées dans cette étude (Annexe 1).

Les mesures sont prises en continu tous les ¼ heures, permettant une durée d'enregistrement de 1,2 années, exceptées pour les lacs d'altitude où la durée d'enregistrement est fixée toutes les ½ heures au cas où les conditions météorologiques empêcheraient une prospection annuelle du lac, indispensable pour le déchargement des enregistreurs.

Le mouillage des enregistreurs est situé dans la zone la plus profonde du plan d'eau en veillant à être suffisamment éloigné des berges pour suivre la masse d'eau en un point représentatif. Dans le cas de retenues, les enregistreurs doivent également être écartés des ouvrages pour ne pas être perturbés par le soutirage ou être entrainés dans les turbines. Dans le cas des lacs d'altitude, le mouillage peut être installé à une profondeur plus faible du fait de la difficulté de trouver la zone de profondeur maximale (absence de bathymétrie récente, risque de comblement…).

De plus, dans le cas des lacs avec des fluctuations de niveau de forte amplitude (> 1.5 m), l'utilisation d'un capteur de pression est essentielle pour connaitre la position des enregistreurs. Ce capteur est installé sur le corps mort d'un mouillage indépendant à faible profondeur pour limiter les efforts de manutention.

Lors du lancement du réseau thermique, il est prévu d'installer des enregistreurs de température dans les principaux tributaires et exutoires des lacs suivis. Cependant, cela ne sera pas réalisé lors de la phase de test car ce n'est pas le propos d'autant que l'ONEMA possède un retour d'expérience significatif dans la pose de sondes en cours d'eau.

1.4. Appareillage de mesure

Est considéré comme tel le système qui permet d'effectuer les mesures du paramètre à suivre, à savoir la température et dans certains cas la pression. Les sondes utilisées proviennent du fournisseur *Prosensor* du fait d'un marché existant et d'un bon retour d'expérience sur ces appareillages par les deux établissements.

1.4.1. Enregistreur de température

Le modèle utilisé pour cette étude est le « *HOBO* WATER TEMP PRO V2/U22-001 » dont la plage d'utilisation varie entre -20°C et +50°C dans l'eau (Figure 2). Leur précision est de ±0,2°C entre 0°C et 50°C et la résolution de 0,02°C à 25°C. La durée de vie des batteries est fixée à 6 ans en condition d'utilisation normale par le constructeur. Son remplacement n'est possible que par intervention du constructeur en usine. Les enregistreurs pèsent 42 g et sont étanches jusqu'à 120 m. La durée de la mémoire varie selon le pas de temps de la mesure : 1,2 ans avec une mesure tous les ¼ d'heure, 2,5 ans avec une mesure toutes les ½ heures.

Figure 2. Enregistreurs de température Hobo équipé à gauche d'une plaquette informative et d'une manille en inox et à droite un enregistreur « nu ». Le capteur de température se trouve à l'extrémité haute entre le bord et le trou d'attache

Pour la réalisation de cette phase de test, 220 enregistreurs ont été achetés par le Pôle et 218 par la Direction Générale de l'ONEMA. Les enregistreurs commandés par la DG sont équipés d'une plaquette en inox avec un identifiant unique ainsi que des informations sur l'étude en cours (Figure 2). Ils seront privilégiés sur les lacs avec des activités récréatives. Les autres, commandés par le Pôle, seront principalement installés sur les lacs d'altitude où du fait de l'accessibilité difficile un bateau gonflable est requis, afin de limiter les risques de crevaison et de diminuer le poids du dispositif.

1.4.2. Enregistreur de niveau d'eau

Le modèle utilisé « *HOBO* WATER LEVEL/U20-001-03 » à une plage d'utilisation qui peut aller jusqu'à 76,5 m (Figure 3). La précision est de ±3,8 cm et la résolution est de 0,87 cm. La durée de vie des batteries est fixée à 5 ans en condition d'utilisation normale. Son remplacement n'est possible que par intervention du constructeur en usine.

L'enregistreur mesure des valeurs de pressions qu'il est nécessaire de compenser par la pression atmosphérique ou par un niveau de référence pour obtenir une valeur de hauteur d'eau ou de cote. Il est donc important de demander au gestionnaire la cote du lac au moment où le capteur commence à enregistrer. Il mesure également la température de l'eau pour estimer la densité de celle-ci. L'enregistreur mesure une pression absolue qui est égale à la somme de la pression atmosphérique et de la pression hydrostatique.

De la même façon que pour les enregistreurs de température, la durée de la mémoire varie selon le pas de temps de la mesure : 225,6 jours avec une mesure tous les ¼ d'heure, 1,2 ans avec une mesure toutes les ½ heures. Ainsi, pour que les durées de stockage soient proches entre les deux appareillages, l'intervalle de mesure du capteur de pression est fixé à une ½ heure. Un total de 4 enregistreurs de pressions a été acheté par le Pôle.

Membrane du capteur de pression situé à 0,41 cm du centre du trou

Figure 3. Enregistreur de niveau d'eau Hobo

1.4.3. Préparation des enregistreurs

Communication

La communication avec les appareillages de mesures est possible à l'aide d'une station de base « USB optique/BASE-U-4 » équipée de coupleurs propres à chaque enregistreur (2-C pour ceux de température et 2-B pour ceux de niveau d'eau) (Figure 4). La base optique étant reliée à un PC, cela permet une communication optique infrarouge avec les enregistreurs pour les programmer, les décharger et connaitre leur état par l'intermédiaire du logiciel « *Hoboware* ».

Figure 4. Base optique permettant la communication avec les appareillages de mesure de type *Hobo*

Programmation

Avant d'installer les enregistreurs de température dans un lac, il est conseillé de vérifier leur déviance. Pour cela, les sondes sont programmées, par exemple, pour un enregistrement toutes les minutes, puis elles sont plongées successivement dans des bains de température homogène. Dans notre cas, 2 bains ont été utilisés : un bain conservé au réfrigérateur et un autre à température ambiante. L'enregistrement des thermomètres à été arrêtée à la fin de l'expérience à l'aide du logiciel « *Hoboware* ».

On a ensuite calculé la moyenne de tous les thermomètres à chaque instant et on a fait un écart à la moyenne. Les calculs ont été réalisés sous « *R* ». Nous avons vérifié que la déviance observée n'était pas supérieure à la précision (0,2 °C) (Annexe 2). En cas de fortes déviances, les enregistreurs peuvent être renvoyés au fournisseur.

Une fois les sondes vérifiées, on peut les programmer pour le suivi en continu. Les appareillages de mesures sont programmables en différé. Il est conseillé de passer l'heure de l'ordinateur en Heure locale exacte, *i.e.* heure dite UTC (*Universal Time Coordinated*) ou dite GMT (*Greenwich Mean Time*), et de faire des copies écran de la programmation et de leur état (Annexe 3) afin de se prémunir en cas de dysfonctionnement auprès du SAV. Lors de cette étape, il est possible de renommer chaque enregistreur avec un code du type : « code du lac » « _ » « profondeur de pose (en cm)» (*i.e.* AUL13_00050).

Décharge

Les mesures sont conservées dans les enregistreurs et il est nécessaire de les décharger régulièrement. Il est préconisé d'avoir une lecture immédiate des données lors de leur décharge pour détecter d'éventuelles anomalies qui impliqueraient le changement d'enregistreurs défaillants. Pour analyser les données, il est possible d'utiliser le logiciel « *Hoboware* » du constructeur ou, préférentiellement, des scripts « *R* » développés au Pôle. Ces derniers permettent de réaliser un graphique avec une superposition des températures de chaque enregistreur (Annexe 4).

Les données doivent être exportées au format « *.txt »* pour que le fichier soit interopérable entre divers logiciels de traitement et au format « *.hobo »* pour traiter ultérieurement les données avec le logiciel « *Hoboware* ».

En ce qui concerne les capteurs de niveau d'eau, on obtient une valeur de pression absolue, or ce qui nous intéresse c'est une valeur de niveau d'eau ou une valeur de hauteur d'eau. Le logiciel permet de traiter les données de valeur absolue à posteriori à l'aide d'un assistant. La procédure consiste soit à rentrer un niveau d'eau (la cote au moment du départ d'enregistrement) pour en déduire la cote du lac, soit à donner une valeur de pression atmosphérique, pour évaluer une hauteur d'eau au-dessus du capteur (*n.b.* penser à rajouter la distance entre le corps mort et la sonde lors des analyses). Les deux traitements sont utiles car on ne connait pas forcément l'altitude 0 à l'aplomb du mouillage pour en déduire les hauteurs d'eau. Les valeurs de pression atmosphérique peuvent être obtenues auprès de Météo France. Il est possible de faire une moyenne sur une année, puis de compenser cette valeur par l'altitude selon la formule des aviateurs:

$$\Delta P(H) = P0 - P(H) = P0\left(1 - \left(\frac{T0 - a * H}{T0}\right)^{n}\right)$$

Avec H, l'altitude, exprimée en m, n=5.2561 (nombre adimensionnel), a = 0.0065 °C/m (chute de la température avec l'altitude), T0 et P0 sont respectivement la température en Kelvin et la pression en hPa au point standard. La température doit s'exprimer en Kelvin (1 °C = 273.15 K).

On obtient ainsi 3 fichiers *txt* pour un capteur de pression : les données de pressions avant traitement, les valeurs de niveau d'eau, et les hauteurs d'eau.

Suivi des enregistreurs

Les informations propres à chaque sonde ainsi que leurs déplacements doivent être conservés (Tableau 3). Certaines de ces informations sont notées sur une fiche de terrain (Annexe 5) et seront utiles lors de l'archivage des données dans une base (cf. 2ème partie du rapport) ou pour les analyses.

Tableau 3. Informations importantes à noter sur les enregistreurs et leurs déplacements lors des campagnes de terrain

	Définition
Informations générales	nom des personnes présentes et organismes
	code ou nom du lac suivi
	date heure de début de la campagne
	date heure de fin de la campagne
Informations sur le matériel d'analyse	numéro de série
	modèle de l'enregistreur
	paramètre suivi
	précision des mesures
	son libellé (nom que l'on peut donner dans « *Hoboware* »)
	pas d'enregistrement des mesures
	date heure de départ des sondes
	profondeur de pose
Informations sur la position des sondes	date heure de mise à l'eau des sondes
	coordonnées des mouillages
	profondeur de pose du capteur de pression
	cote du lac au départ des sondes (si présence d'un capteur de pression)
	date heure de relève des sondes

1.5. Solutions de mouillage : de la réalisation à la récupération des données

1.5.1 Matériels nécessaires au montage des solutions de mouillage

Les solutions de mouillage incluant les sondes de température sont des solutions faites main construites à partir d'enregistreurs individuels et d'éléments d'accastillage (Tableau 4). Ces derniers sont en inox du fait de leur très bonne tenue dans l'eau. Leur résistance a été un facteur prépondérant dans le choix des éléments (Annexe 6). Ces solutions faites main sont moins couteuses qu'un système automatique de type "ballast" tel que proposé par la société NKE (Annexe 7).

Les solutions sélectionnées pour la phase de test font suite à plusieurs réunions de travail entre les contributeurs à ce projet et permettent de parer aux contraintes environnementales et logistiques décrites dans le Tableau 2.

Pour suspendre des charges statiques et pour des opérations de levage ponctuelles (relevage du corps mort…), il est nécessaire d'utiliser des serre-câbles. Leur nombre et leur position sont spécifiés par la norme NF EN 13411-5+A1. Pour du câble gainé de 3 mm de diamètre, il est requis de mettre 3 serres-câbles (de même diamètre que le câble) espacés de 6 à 8 fois le diamètre du câble et de le dénuder à leur emplacement (Figure 5). L'extrémité des brins morts de câble peuvent être recouvert de scotch étanche notamment lors de l'utilisation d'un bateau gonflable afin d'en réduire les risques de crevaison lors des manipulations.

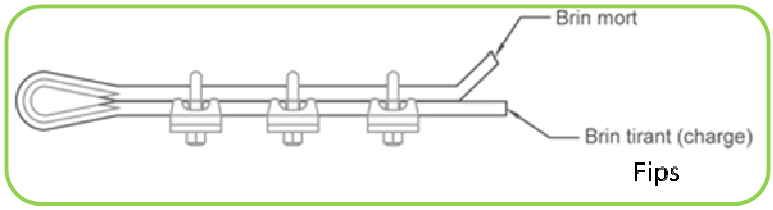


Figure 5. Position correcte des serres-câbles

Tableau 4. Liste du matériel nécessaire à la confection des mouillages

	Description
Eléments du mouillage	bouée de surface
	bouée de sub-surface
	câble en inox gainé Ø3 mm
	anneau brisé inox Ø22mm
	cadenas étanche
	chaine inox Ø5 mm
	chambre à air
	collier en plastique
	descendeur escalade
	disque de fonte 1, 2, 5 et 10 kg
	émerillon Ø8 mm
	enregistreur de température
	enregistreur de niveau d'eau
	étrier de selle inox
	manille Ø8mm
	mousqueton inox à œil Ø8mm
	panneau informatif
	serre câble à étriers inox
	cordage Ø8 mm
	tige fer à béton
	corps mort en béton
	tube pvc + manchons + bouchons dévissables
Matériel pour la fabrication des mouillages	mètre
	pince coupante
	pince multiprise
	pince à dénuder
	pince pour colliers plastique
	marqueur
	cutter
	scotch étanche
	pince
	clé à tube/pipe
	clé dynamométrique
	colle à pvc
	papier à poncer

1.5.2. Description des mouillages pour les enregistreurs de température et de leur montage

Une bouée est reliée au corps mort à l'aide d'un câble (câble A). Un second câble, attaché sous la bouée (câble B) et lesté, sert de support aux enregistreurs de température placés aux profondeurs choisies (Figure 6). L'ensemble des solutions de mouillage suit ce patron et est ensuite adapté aux contraintes propres à chaque lac.

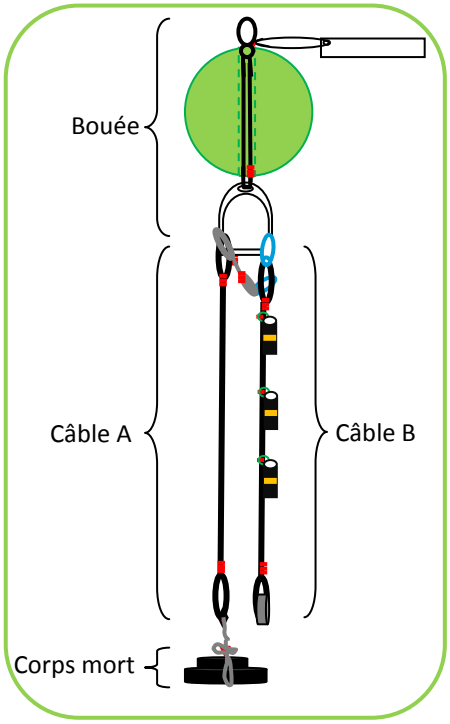


Figure 6. Présentation des diverses composantes du mouillage pour les enregistreurs de température

Bouée

Les bouées *Rotax Marine* ont été choisies car remplies de mousse, elles sont insubmersibles et résistent au gel. Trois volumes sont proposés à la vente (40, 64 et 129 L). La totalité des bouées commandées sont de couleur verte. Pour les lacs ayant un fort attrait paysager comme les lacs alpins, les bouées seront mises à 50 cm sous la surface (bouée dite de sub-surface). Ces lacs étant gelés une grande partie de l'année, il est nécessaire que la bouée résiste à de fortes pressions ainsi, nous avons choisi des flotteurs *Nokalon* (Figure 7). Ils sont normalement destinés à la pêche en mer à de grandes profondeurs (950 m pour celui choisi) et sont particulièrement résistants à la pression de la glace (communication personnelle d'Emmanuel MALET, laboratoire Edytem).

Figure 7. Bouée *Rotax Marine* à gauche et flotteurs *Nokalon* à droite

Le choix des bouées repose également sur leur flottabilité. Pour chaque lac, la masse et le volume des différents éléments sont calculés en dehors du corps mort à l'aide d'une macro *Excel* (Annexe 8). Puis, le volume est soustrait à la masse pour obtenir le poids apparent (= résultante) dans l'eau. Une marge de

sécurité de 30 % est ajoutée à cette résultante. La flottabilité maximale (masse pour que la bouée s'enfonce totalement dans l'eau) doit être supérieure à cette valeur (
Tableau 5). Dans le cas des bouées de sub-surface des lacs à accessibilité difficile, cette flottabilité ne doit pas être trop élevée car cela nécessiterait de mettre un corps mort injustement très lourds pour que la bouée ne flotte pas.

Tableau 5. Valeur des résultantes pour chaque site pilote assorti d'un coefficient de sécurité de 30% et permettant de choisir les bouées selon leur flottabilité maximale

	Salagou	Pavé	Malrif	Lauzanier	Aulnes	Pierre-Châtel	Pavin	Sainte Croix	Bimont
Masse (kg) sans bouée	13.88	8.43	6.24	3.40	5.33	5.75	16.74	19.60	24.40
Volume (L) sans bouée	4.48	3.26	2.36	1.00	1.23	1.42	6.29	5.32	5.41
Résultante (kg)	**9.40**	**5.17**	**3.87**	**2.40**	**4.10**	**4.32**	**10.45**	**14.28**	**18.99**
Coefficient de sécurité 30% (kg)	12.22	6.72	5.04	3.12	5.33	5.62	13.58	18.57	24.68

La hauteur d'enfoncement des bouées de surface est déterminée à l'aide d'une macro *Excel* (valable uniquement pour les bouées achetées) (Annexe 1). Dans les lacs soumis à marnage, la hauteur d'enfoncement de la bouée est variable selon si la chaine repose en partie ou non sur le fond du lac. Cependant, ce n'est pas considéré ici puisque la totalité de la chaine (masse et volume) rentre dans le calcul de la résultante. Si, pour l'équipement d'autres sites, les bouées diffèrent, il est possible de réaliser un test empirique (e.g. immersion dans un contenant) pour déterminer la hauteur d'enfoncement.

Les deux types de bouée, de surface ou de sub-surface, possèdent une cheminée centrale. Le dispositif permettant de fixer les 2 câbles A et B (Tableau 6) comporte :

- un descendeur d'escalade qui est posé sur le dessus de la bouée ou enfoncé dans la cheminée si possible (Figure 8) ;

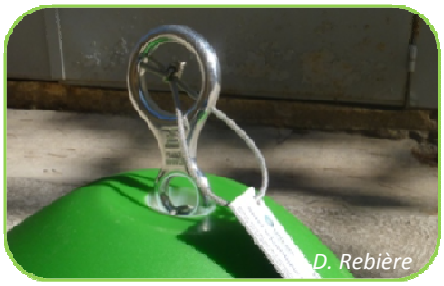
- un étrier de selle en inox qui permet de bien séparer les 2 câbles et qui est résistant ;

- un câble, dont la longueur est égale à 2,5 fois la hauteur de la bouée qui passe dans le plus petit des anneaux du descendeur et dans la cheminée (un des deux brins passe dans l'œillet d'un étrier de selle et les deux brins sont attachés à l'aide de 3 serres câbles (Figure 9) qui sont glissés à l'intérieur de la cheminée pour qu'ils ne soient pas accessibles ;

- un panneau informatif, attaché sur le dessus de la bouée par un câble de 30 cm de long, passé dans un des anneaux du descendeur, fermé à l'aide d'un seul serre-câble (Figure 10), et ayant pour but de sensibiliser les personnes au projet et de limiter les risques de vandalisme.

Tableau 6. Quantité des éléments nécessaires au montage de la bouée

Eléments	Quantité
bouée (de surface ou de sub-surface)	1
panneau informatif (200x100mm)	1
étrier de selle inox	1
descendeur escalade	1
câble en inox gainé Ø 3 mm	**longueur en mètre** = 0.3 (*fixation panneau informatif*) + 2.5 x Hb
serre-câble à étriers	4 (*1 pour boucle du panneau informatif + 3 pour attacher les deux brins de câble*)



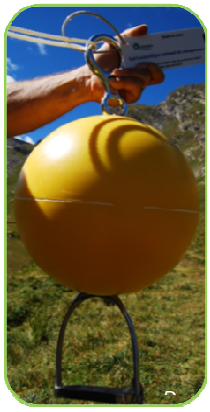


Figure 8. Dispositif pour fixer les câbles A et B sur les bouées disposant d'une cheminée centrale

Figure 9. Attache des 2 brins de câble au niveau de l'œil de l'étrier sous la bouée

Figure 10. Panneau informatif en pvc fixé sur la bouée (L: 220 mm, h: 100 mm)

Câble A

Le câble est fixé sur une des 2 branches de l'étrier à l'aide d'une boucle fermée par 3 serre-câbles. A l'autre extrémité, une autre boucle est réalisée dans laquelle est passé un émerillon (Figure 11). La quantité de câble nécessaire dépend du type de mouillage (Tableau 7). Dans le cas, des bouées de sub-surface, le mouillage est posé à une profondeur inférieure à 2 m à celle maximale pour facilité la pose car cette zone peut être d'une surface infime. De plus, une chaine avec 2 manilles peut être utilisée entre l'étrier et la boucle du câble A pour ajuster le positionnement de la bouée à 50 cm sous la surface de l'eau.

Figure 11. Montage de l'ensemble émerillon + manille pour ajouter de la chaine au câble A

Une chaine inox est ajoutée à l'aide d'une manille qui passe dans l'émerillon dans le cas des mouillages de surface, soit pour compenser l'amplitude des oscillations verticales, soit en sécurité si le substrat de fond est mou et que le corps mort à tendance à s'enfoncer. La longueur de la chaine diffère si le lac est soumis à marnage (Tableau 7). Les quantités pour chaque site pilote sont présentées en Annexe 9.

Tableau 7. Quantité des éléments nécessaires au montage du câble A

Eléments	Quantité
câble en inox gainé Ø 3 mm	**longueur en mètre si bouée de surface** = Pmax - Mmax + 0.5 (*surplus pour les boucles*) **longueur en mètre si bouée de sub-surface** = Ppose - Mmax + 0.5 (*surplus pour les boucles*) - 0.5 (*profondeur de la bouée*) - Hbe
serre-câble à étriers	6 (*3 pour chaque boucle aux extrémités du câble*)
émerillon Ø8 mm	1
chaine inox Ø5 mm	**longueur en mètre si bouée de surface et marnage** =Mmax + 4 (*surplus*) **longueur en mètre si bouée de surface pas de marnage** =2 (*surplus*)
manille Ø8 mm	**si mouillage de surface** 1 sinon 0

Câble B et enregistreurs de température

A l'extrémité supérieure du câble, une boucle est formée avec 3 serres-câbles de façon à ce que le premier enregistreur soit à 50 cm sous la surface, sachant que la hauteur d'enfoncement de la bouée (de surface) est connue à l'aide de la macro *Excel*. Dans les cas des lacs d'altitude le premier enregistreur thermique est accroché sur le dessus de la bouée pour qu'elle se situe à 50 cm sous la surface (hors descendeur d'escalade). Pour cela, on utilise le même câble qui sert à attacher le panneau informatif que l'on passe au préalable dans l'anneau de l'enregistreur (Figure 12). Si aucune activité récréative n'est recensée sur le lac, on passe au préalable l'œil d'un mousqueton de 8 mm dans la boucle (Figure 13). S'il existe un risque de vandalisme, un cadenas étanche remplace le mousqueton à œil. Le câble viendra se fixer sur la seconde branche de l'étrier soit avec le mousqueton soit avec le cadenas. Un lest est placé à l'autre extrémité, toujours fermé par une boucle avec 3 serre-câbles (Figure 14). Si le mouillage est installé sur un lac difficile d'accès, la masse du lest est de 1 kg, sinon il pèse 2 kg. Ce sont des disques de fonte recouverts de caoutchouc. Le long du câble, des serre-câbles sont disposés pour fixer les thermomètres aux profondeurs voulues dans lesquels sont passés 1 anneau brisé si les thermomètres sont équipés d'une manille ou 2 si les thermomètres sont nus (Figure 15). Les enregistreurs sont maintenus à la verticale à l'aide d'un collier en plastique sur une chambre à air pour un meilleur maintien des colliers et limite l'encrassement des sondes (Figure 15). Le nombre de thermomètres résulte de la profondeur maximale du lac et de la présence de marnage (Tableau 8).

Un câble de sécurité de 0,5 m permet de relier les câbles A et B. Une des boucles passe dans la branche de l'étrier où se trouve le câble A, fermée par 3 serre-câbles. L'autre extrémité du câble passe dans l'œil d'un mousqueton, également fermées par 3 serre-câbles. Le mousqueton s'accroche dans la boucle supérieure du câble B (Figure 16).

Dans le cas où le lac ne subit pas de marnage, le dernier enregistreur est situé à 50 cm au dessus du fond du lac pour qu'il ne prenne pas des mesures dans les sédiments. La longueur du câble B dépend à la fois du type de mouillage et de la profondeur maximale du lac (Tableau 8). Les quantités pour chaque site pilote sont présentées en Annexe 9.

Figure 12. Montage du premier enregistreur sur la bouée dans le cas de mouillage de sub-surface

Figure 13. Montage du câble B sur une des branches de l'étrier de selle avec un mousqueton s'il n'y a pas de vandalisme

Figure 14. Montage du lest sur le câble

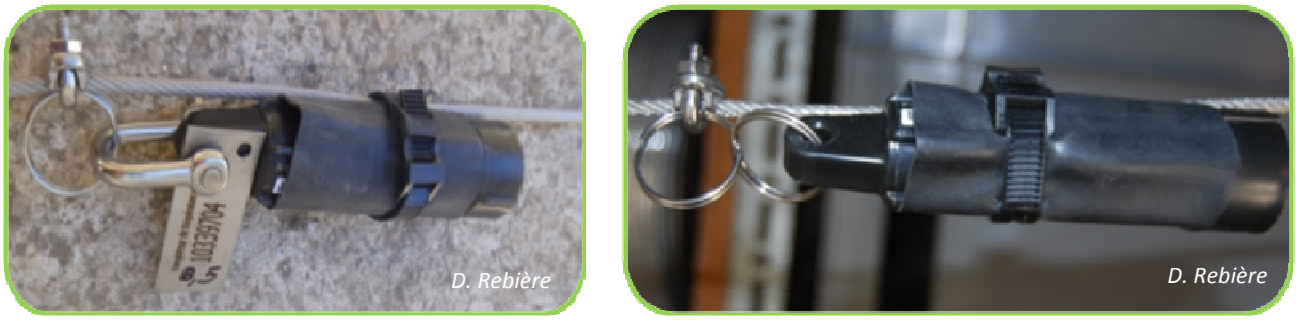


Figure 15. Enregistreur de température fixé sur le câble B équipé avec 1 anneau brisé (à droite nu avec 2 anneaux brisés)

Figure 16. Montage du câble de sécurité entre les câbles A et B

Tableau 8. Quantité des éléments nécessaires au montage du câble B

Eléments	Quantité
enregistreur de température	**nombre d'enregistreur si Pmax < 10m et marnage** = arrondi inférieur (Pmax – Mmax + 0.5) **nombre d'enregistreur si Pmax ≥ 10m et marnage** = arrondi inférieur (Phypo + 0.5) (*nb de thermomètres dans épilimnion*) + arrondi inférieur ((Pmax – Mmax - Phypo)/4) (*nb thermomètres dans hypolimnion*) **nombre d'enregistreur si Pmax < 10m sans marnage** = arrondi inférieur (Pmax - 0.5 + 0.5) = arrondi inférieur (Pmax) **nombre d'enregistreur si Pmax ≥ 10m sans marnage** = arrondi inférieur (Phypo + 0.5) (*nb de thermomètres dans épilimnion*) + arrondi inférieur (Pmax - Phypo)/4) (*nb thermomètres dans hypolimnion*)
anneau brisé Ø22 mm	nombre thermomètres équipés + 2 x nb thermomètre nus
chambre à air	7 cm de chambre à air sur chaque thermomètre
collier en plastique	nombre de thermomètres
mousqueton inox à œil Ø8mm	si activités récréatives 1 sinon 2
cadenas étanche	si activités récréatives 1 sinon 0
serre-câble à étriers	=6 (*boucles du câble de sécurité*) +6 (*boucles aux extrémités du câble B*) + nb thermomètres
câble en inox gainé Ø3 mm	**longueur en mètre si bouée de surface et Pmax ≥ 10m** =nb de thermomètres dans épilimnion + nb thermomètres dans hypolimnion x 4 + 0,5m (*surplus pour les boucles*) + 0.5m (*câble sécurité*) **longueur en mètre si bouée de surface et Pmax < 10m** = nb de thermomètres dans le lac + 0.5 (*surplus pour les boucles*) + 0.5m (*câble sécurité*) **longueur en mètre si bouée de sub-surface et Pmax ≥ 10m** =nb de thermomètres dans épilimnion + nb thermomètres dans hypolimnion x 4 + 0.5 (*surplus pour les boucles*) - 0,5 (*profondeur de la bouée*) - Hbe + 0.5m (*câble sécurité*) **longueur en mètre si bouée de sub-surface et Pmax < 10m** = nb de thermomètres + 0,5m (*surplus pour les boucles*) - 0,5m (*profondeur de la bouée*) - Hbe + 0,5m (*câble sécurité*)
lest	disque de fonte de 1 kg si bouée de sub-surface sinon 2 kg

Corps mort

Des disques de fonte recouverts de caoutchouc sont utilisés comme corps morts (Figure 17). Leur faible hauteur par rapport à leur surface évite leur basculement. De plus, il est possible d'empiler des disques pour choisir la masse totale voulue et sont facilement manipulables. L'enrobage empêche le développement de la rouille et permet une meilleure manipulation. Les disques disposant d'un trou central sont assemblés avec une chaîne, fermée par une manille d'une longueur de 65 cm (Tableau 9). Les quantités pour chaque site pilote sont présentées en Annexe 9. Dans le cas des mouillages en surface, les disques sont attachés avec la chaîne située à l'extrémité du câble A. Les corps morts de 15 kg sont formés à l'aide d'un disque de 5 kg et un autre de 10 kg. Les corps morts sur les lacs d'altitude difficile d'accès sont de 10 à 12 kg, réalisés à partir de poids de 2 kg, permettant mieux les répartir en cas de transport à pieds.

Figure 17. Photo d'un corps mort pour le mouillage des enregistreurs de température

Tableau 9. Quantité des éléments nécessaire au montage du corps mort

Eléments	Quantité
disque de fonte	**si accès facile** 15 kg, sinon 10 kg
chaine inox Ø5mm	**longueur en mètre si bouée de sub-surface** 0.50 m
manille Ø8mm	1

On distingue ainsi 3 principaux mouillages : de sub-surface pour les lacs avec un fort attrait paysager (ici les lacs d'altitude appartenant au réseau des lacs sentinelles), de surface sans marnage et de surface avec marnage (Figure 18).

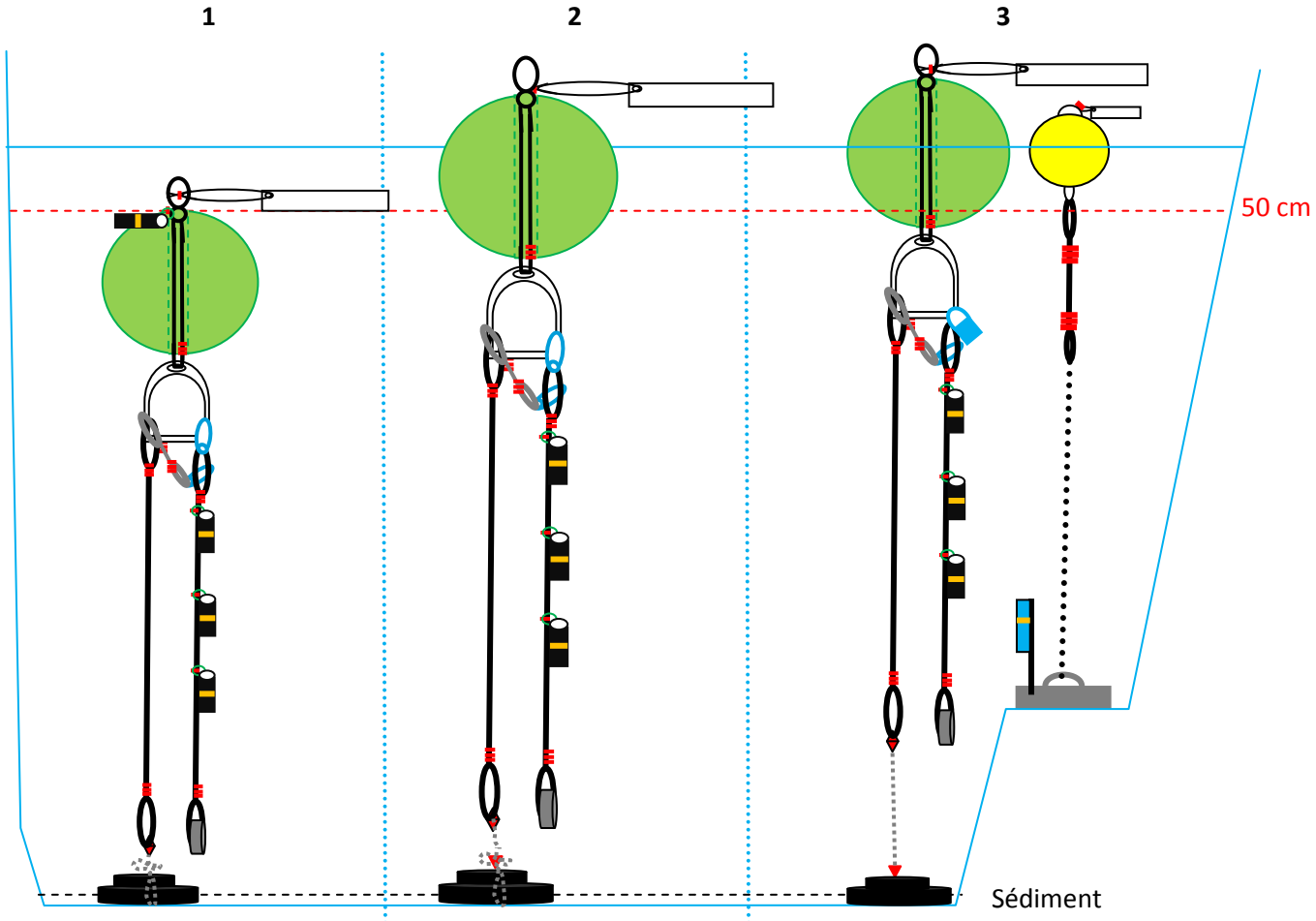
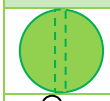
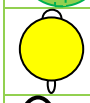
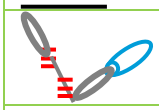


Figure 18. Schémas des mouillages de 1/sub-surface (Pavé, Lauzanier, Malrif), 2/ surface sans marnage (Aulnes, Pierre-Châtel, Pavin) et 3/surface avec marnage (Sainte Croix, Bimont, Salagou), *les schémas ne sont pas à l'échelle*

Tableau 10 : Légende de la figure précédente

Légende	
	Bouée avec cheminée centrale
	Bouée de mouillage
	Descendeur d'escalade
	Panneau informatif accroché par câble + 1 serre-câble
	Etrier de selle inox
	Câble en inox gainé Ø3 mm
	Câble de sécurité (câble avec 2 boucles + mousqueton à œil)
	Enregistreur de température avec anneau brisé (vert) + collier en plastique (orange)
	Lest de 2 kg (disque de fonte enrobé de caoutchouc)
	Emerillon Ø8 mm
	Manille Ø8mm
	Chaine inox Ø5 mm
	Capteur de pression enfermé dans tube pvc
	Cordage Ø8 mm
	Serre-câble à étriers inox
	Cadenas étanche
	Mousqueton à œil inox à œil Ø8mm
	Corps mort en béton + tige de fer à béton
	Corps mort en disques de fonte

1.5.3. Description du mouillage du capteur de pression et de son montage

Les fluctuations des niveaux d'eau empêchent de connaitre la position des enregistreurs de température par rapport au fond du plan d'eau. Une solution consiste à installer un capteur de pression à une position parfaitement fixe. Il est préconiser de réaliser un second mouillage qui sera posé à une faible profondeur pour limiter les efforts liés à la manutention (25 m maximum) (Figure 18). En effet, fixer ce capteur au corps mort du mouillage des thermomètres annulerait l'avantage d'utiliser deux câbles sur le mouillage principal.

Une bouée de mouillage classique (en pvc rigide rempli d'air) peut être utilisée car elle ne nécessite pas une grande flottabilité (Figure 19). Cependant, il est préférable d'utiliser une bouée moussée insubmersible. Un câble d'environ 2 m est fixé sous la bouée pour limiter le vandalisme par une boucle avec 3 serre-câbles (Tableau 11) plus difficile à sectionner. De la même manière, une boucle est faite à l'autre extrémité du câble dans laquelle est accrochée une corde de 6 ou 8 mm de diamètre. Elle est attachée au câble et au corps mort par des nœuds de chaise. Sa longueur est déterminée une fois sur le terrain en

fonction de la profondeur de pose et du marnage maximal qui peut être observé (Tableau 11). Le corps mort est fabriqué en béton avec deux tiges de fer à béton de 8 mm de diamètre (solidité suffisante tout en permettant une torsion): une pour servir de poignée pour y fixer la corde, et une à la verticale (1 m de hauteur) pour fixer le capteur de pression (Figure 20). Il est de forme circulaire et sa hauteur est largement inférieure à son diamètre par rapport à sa surface afin qu'il ne bascule pas sur le côté. La poignée pourra être recouverte par un bout de tuyau ou du scotch afin de limiter le cisaillement de la corde. Sur le haut de la tige de fer à béton, un cylindre en pvc, préalablement percé de trous, et sur lequel des manchons sont collés de part et d'autre (poncer pour une meilleure accroche de la colle) et fermé à chaque extrémité par des bouchons dévissables, sert de protection au capteur de pression (Figure 21). Le cylindre est stabilisé par de la cordelette et des colliers en plastiques sur la tige de béton. Par sécurité, une cordelette relie le capteur de pression directement à la tige. Il est important de noter la distance entre la membrane du capteur de pression (Figure 3) et le bas du capteur de pression pour obtenir la hauteur d'eau par la suite. Dans le cas d'un lac à forte fréquentation, un panneau informatif peut être installé sur la bouée (cas du Salagou).

Figure 19. Bouée équipée d'un panneau informatif pour le mouillage du capteur de pression

Figure 20. Capteur de pression fixé sur un corps mort en béton

Figure 21. Montage du tube pvc sur une tige de fer à béton pour contenir le capteur de pression

Tableau 11. Quantité des éléments nécessaires pour le mouillage du capteur de pression en cas de marnage

Eléments	Quantité
bouée de mouillage	1
câble en inox gainé Ø3 mm	**longueur en mètre** = 2 + 0,5 (*surplus pour les boucles*)
serre câble à étriers inox	7 (*6 pour boucles aux extrémités du câble + 1 attache du panneau informatif)*
cordage Ø8 mm	**longueur en mètre** = Ppres - 2 (*longueur du câble*) + 1 (*surplus pour nœuds*) + Mmax
enregistreur pression	1
tube pvc	1
manchons pvc	2
bouchons dévissables	2
collier en plastique	3
corps mort en béton	1
tige fer à béton Ø8 mm	**longueur en mètre** 2

1.5.4. Installation des mouillages

Avant toute installation d'un mouillage sur un lac, une demande d'autorisation doit être envoyée au propriétaire accompagnée d'une note technique pour expliquer l'objectif du projet (Annexe 10). Une demande d'autorisation de navigation est également sollicitée auprès de la DDT (Direction Départementale des Territoires). Si des activités récréatives existent sur le lac, des affiches peuvent être apposées sur les berges sous conditions d'acceptation du propriétaire/gestionnaire. L'ensemble du matériel doit être désinfecté avant chaque installation (bateau, chaussures, rames…) pour éviter la propagation d'agents pathogènes entre les sites.

Afin d'éviter l'emmêlement des câbles pendant le transport et sur le bateau et pour faciliter la mise à l'eau du mouillage, les câbles A et B peuvent être rangés sur des enrouleurs distincts.

Une fois le bateau mis à l'eau, la position du mouillage doit être repérée à l'aide d'une carte bathymétrique si disponible, sinon à l'aide d'un GPS. La position doit respecter les conditions énoncées dans le protocole (cf. § 1.3) et le fond du plan d'eau au lieu de pose doit être relativement plat. On commence par mettre à l'eau le corps mort (disque de fonte) du mouillage principal avec le câble A pour finir par la bouée. Il est possible de s'amarrer à la bouée pour limiter la dérive lors de la pose des enregistreurs thermiques. On commence par mettre à l'eau le lest jusqu'à l'extrémité supérieure du câble. A ce moment, on met le mousqueton du câble de sécurité dans la boucle du câble B, puis on relie le câble B à la branche de l'étrier soit avec un mousqueton soit avec un cadenas selon ce qui est préconisé (Figure 22). Les coordonnées géographiques sont notées (degrés décimaux). D'autres informations telles que la date, les heures de fin et de début de la campagne sont notées sur la fiche terrain (Annexe 5). Le mouillage étant installé, un profil ponctuel de température est effectué à ce moment. Une fois ces étapes finies, on peut détacher l'amarrage de la bouée au bateau.

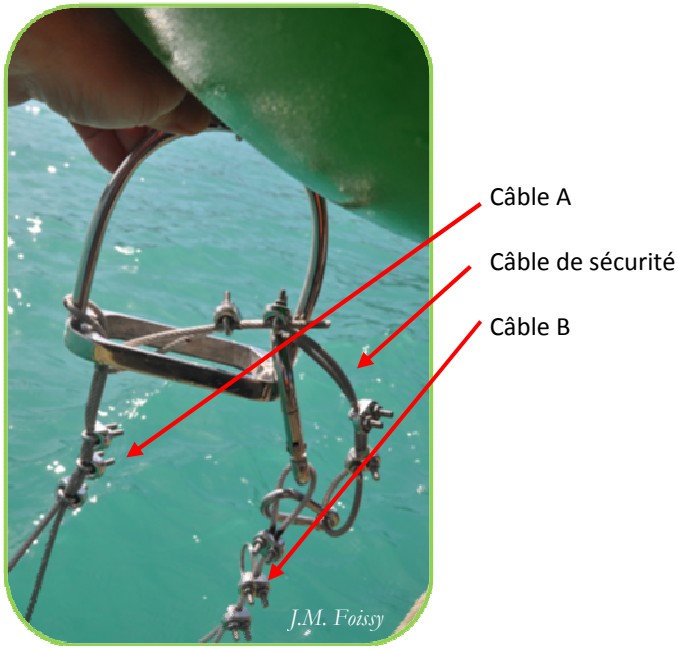


Figure 22. Montage des câbles sur l'étrier de selle

Dans le cas des lacs soumis à marnage, la position du mouillage du capteur de pression doit être déterminée. Pour cela, il est préférable de choisir une zone assez plane à une profondeur n'excédant pas 25 m. Au vu de la profondeur, la corde est coupée à la longueur voulue et attachée au corps mort et au

câble. On immerge le mouillage par le corps mort pour finir par la bouée. Si cela est possible, à l'aide d'une caméra aquatique, on vérifie que le corps mort repose bien à plat pour ne pas fausser les mesures.

1.5.5. Récupération des données

Lors de la récupération des données, il est nécessaire de prévoir du matériel de rechange (enregistreurs et accastillage).

La première étape est le repérage du mouillage et la réalisation d'un profil thermique avec une sonde manuelle à proximité. Cela permettra un premier contrôle de la dérive temporelle des enregistreurs pour en tenir compte lors de l'analyse des données. Juste avant que le câble B soit sorti de l'eau, l'heure est notée (UTC). Le câble peut être mis au fur et à mesure sur un enrouleur.

Si un second mouillage est présent pour le capteur de pression, il faut également le sortir et noter l'heure UTC avant de le sortir de l'eau. Avant sa remontée, on peut aussi préalablement contrôler la bonne position du corps mort avec une caméra et noté sa position en cas de problème afin de pouvoir en tenir compte lors des analyses.

Dès que l'ensemble des enregistreurs est remonté, il est conseillé d'opter pour leur décharge et leur reprogrammation sur la berge ou dans un abri plutôt que sur le bateau pour une meilleure aisance. La première étape consiste à décharger les enregistreurs (penser à conserver les fichiers « *.txt* » et « *.hobo* ») et à vérifier visuellement les données (Annexe 4). Si le temps alloué à la mission le permet, on peut également contrôler la déviance des thermomètres, en particulier si le lac subit des conditions météorologiques extrêmes. Pour cela, de l'eau du lac est mise dans un contenant et les thermomètres sont programmés pour un enregistrement toutes les minutes et plongés dans le contenant pendant 1h avec un thermomètre de précision. Ensuite, on les décharge à nouveau puis et on lance le script R (Annexe 2). Si un thermomètre est défaillant (*i.e.* écart de plus de 0,5°C avec le thermomètre de précision), on le change ainsi sur site. Les enregistreurs, à ce moment, sont reprogrammés en différé pour le suivi, d'où la nécessité de faire des copies-écran afin de conserver les informations de programmation pour chaque thermomètre. A présent, les enregistreurs sont remis en place de la même manière que lors de leur installation (cf. §1.5.3). Dans le but d'assurer le suivi en continu, il est essentiel de réaliser ces étapes (décharge, vérification du bon fonctionnement, reprogrammation et immersion des sondes) au cours de la même campagne. Si cela n'est pas possible, on ramène les sondes au laboratoire pour les tester afin de les immerger à nouveau au plus vite.

1.6. Evaluation des coûts d'investissement

1.6.1. Coûts matériels

Les couts sont estimés pour chaque composante du mouillage (Tableau 12). Un surplus de 10% pour l'achat de pièces de rechanges est calculé sur le prix total afin de le surestimé. Les montants sont basés sur les prix unitaires de chaque élément (Annexe 6).

1.6.2. Coûts logistiques

Cout de transport/hébergement

Les coûts organisationnels comprennent les temps de déplacement sur chaque site (Tableau 13). Ils sont basés sur un remboursement de 60 centimes d'€ par kilomètre parcouru, 60€ la nuitée et 15.25€ le repas (source : intranet Irstea). Le Pôle est considéré comme le point de départ vers les sites pilotes.

Cout de fonctionnement

Pour chaque opération, un technicien et un ingénieur au minimum sont requis (Tableau 14). Le tarif horaire est donné en euros hors taxes. Il est évalué à 60 € pour un technicien et 75 € pour un ingénieur.

1.6.3. Estimation des coûts globaux

A partir des estimations précédentes, nous avons établi un coût global du fonctionnement du réseau pour chaque site pilote. Sont considérés ici la réalisation du mouillage, sa mise à l'eau et un premier cycle de décharge (Tableau 15).

Tableau 12. Evaluation des couts matériels pour les 9 sites pilotes, les 10% représentent le stock de pièces de rechange (prix en € HT)

Site pilote	Bouée	Câble A	Câble B	Corps mort	Mouillage capteur pression	Total	+ 10%	Total sans sonde
Pavé	83,49	85,39	4230,40	31,72	0,00	4431,00	4874,10	406,00
Malrif	83,49	59,79	3214,49	31,72	0,00	3389,49	3728,43	330,49
Lauzanier	83,49	32,45	1214,66	31,72	0,00	1362,31	1498,54	235,31
Aulnes	105,49	52,42	889,41	55,79	0,00	1103,11	1213,42	298,11
Pierre-Châtel	105,49	59,52	1055,46	55,79	0,00	1276,26	1403,89	310,26
Pavin	105,49	157,72	6424,51	55,79	0,00	6743,51	7417,86	625,51
Bimont	114,99	259,38	4534,85	55,79	630,20	5595,21	6154,73	678,21
Sainte Croix	114,99	254,25	4572,88	55,79	630,20	5628,11	6190,92	711,11
Salagou	105,49	147,23	4886,80	55,79	630,20	5825,51	6408,06	586,51
						35354,50	**38889,95**	**4181,50**

Tableau 13. Estimation des coûts de transport et d'hébergement pour 1 personne

Site pilote	Distance km	Nuitée	Repas	Coût/personne € HT
Pavé	274	2	5	360,65
Malrif	239	1	3	249,15
Lauzanier	233	1	3	245,55
Aulnes	64	0	1	53,65
Pierre-Châtel	231	0	1	153,85
Pavin	488	1	2	383,3
Bimont	15	0	1	24,25
Sainte Croix	100	0	1	75,25
Salagou	213	0	1	143,05

Tableau 14. Détail des coûts en personnel pour chaque opération

Opération	Périodicité	Personnel	Durée (heures)	Tarifs journaliers € HT
Réalisation du mouillage	1/6 ans	2	7	945
Mise à l'eau	1/6 ans	2	3	405
Relevage du mouillage	1/an	2	3	405
Déchargement des données	1/an	2	0.05/sonde	189 (pour 25 sondes soit 1h15)
Maintenance	1/an	2	4	540

Tableau 15. Estimation des coûts globaux de fonctionnement pour chaque site pilote pour la réalisation du mouillage, un cycle de mise à l'eau/décharge réalisés par un technicien et un ingénieur (les tarifs sont en € HT)

Site pilote	Coût matériel	Cout de transport hébergement	Cout de fonctionnement	Total
Pavé	4874,10	556,90	2322,00	7753,00
Malrif	3728,43	354,90	2288,25	6371,58
Lauzanier	1498,54	351,30	2207,25	4057,09
Aulnes	1213,42	68,90	2200,50	3482,82
Pierre-Châtel	1403,89	169,10	2200,50	3773,49
Pavin	7417,86	473,80	2423,25	10314,91
Bimont	6154,73	39,50	2355,75	8549,98
Sainte Croix	6190,92	90,50	2349,00	8630,42
Salagou	6408,06	158,30	2362,50	8928,86
TOTAL :	38889,95	2263,20	20709,00	61862,15

2 ème partie : pré-traitement des données récoltées

Lors du déchargement, chaque enregistreur fournit un fichier contenant les mesures. Cela représente une importante quantité de données qu'il est nécessaire de contrôler, valider et archiver avant stockage selon 3 étapes successives (Figure 23).

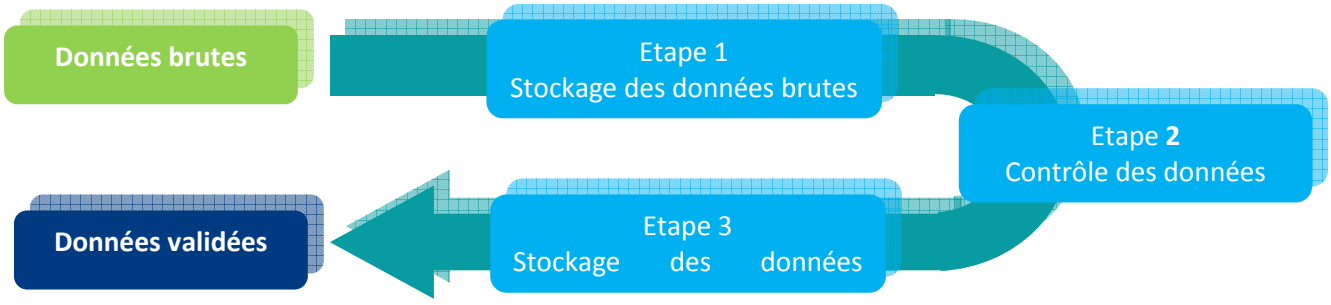


Figure 23. Schéma du traitement des données

2.1. Etape 1 : Stockage des données brutes

Les données provenant des enregistreurs sont stockées au Pôle « hydro-écologie des Plans d'Eau » à Aix-en-Provence en attendant la mise en service de *Naïades*. Elles sont rangées par lac (stipulé par son « code lac »), puis par date de décharge. Chaque fichier est renommé ainsi : « date de relève » « _ » « code lac » « _ » « profondeur de pose » (*e.g.* « 20130731_SCR04_00050 »). Les profondeurs sont exprimées en cm. Dans le cas du capteur de pression, la profondeur de pose est remplacée par « pres » pour le fichier

contenant les valeurs de pression absolues, par « cote » pour celui contenant les cotes du lac, et par « prof » pour celui contenant les hauteurs d'eau au-dessus du capteur (e.g. 20130731_SCR04_pres, 20130731_SCR04_cote, 20130731_SCR04_prof). **Les données doivent êtres impérativement conservées au format « *.hobo* » et « *.txt* »** car le format « *hobo* »est le format natif du système de téléchargement des sondes et est lisible par le logiciel associé qui permet une visualisation rapide des données.

2.2. Etape 2 : Contrôle des données

Cette partie est basée sur les documents suivants : Adams, 2013; Sowder and Steel, 2012 et toutes les opérations seront semi-automatisées par un script R en cours de développement au Pôle.

La première phase du contrôle consiste à supprimer les mesures hors de la période de déploiement des enregistreurs dans l'eau à l'aide des heures locales exactes (UTC) de mise à l'eau et de relève, conservées dans un fichier nommé « @.txt ». Toutes les autres mesures sont conservées en leur attribuant un code de qualité selon la nomenclature 414 (SANDRE, 2013). Ce code qualité est octroyé après des vérifications, principalement graphiques. Les valeurs suspectes sont identifiées par :
- un changement de plus de 3°C entre deux valeurs successives ;
- des valeurs constantes sur une longue période (excepté pour les enregistreurs de surface pris en glace) ;
- des comparaisons avec les températures de l'air (si disponibles) et/ou les sondes les plus proches.

Les données sont, par la suite, exportées au format « *.txt* » ou « .csv » afin d'être archivées dans une base. Le nom des fichiers est identique à celui des données brutes avec le suffixe « _val ».

2.3. Etape 3 : Stockage des données validées

2.3.1. Architecture de la base

Les données validées sont conservées dans une base dédiée. Cette base est créée selon les recommandations du SANDRE suivant un schéma conceptuel entité-relation (SANDRE, 2013). Elle est crée au format « Access » mais pourra migrer ultérieurement sous un autre format libre de droits. Cette base permettre d'archiver des données de température issues aussi bien de plans d'eau que de cours d'eau.

Les noms des tables commençant par « t_sa » correspondent aux nomenclatures et référentiels SANDRE ; ainsi 7 tables sont à remplir avec les données issues du réseau (Figure 24). Les noms des entités (tables) et des attributs (champs) sont généralement issus des noms des balises *xml* proposés dans les dictionnaires des données Sandre. La description des champs des 7 tables à compléter est détaillée dans le Tableau 16.

Le passage des données validées issues du contrôle (étape 2) à l'archivage dans la base se fait par l'intermédiaire d'un tableur *Excel*. Celui-ci contient autant d'onglets que de tables à remplir et le nom des colonnes est identique à celui des champs. Ce fichier est nommé de la manière suivante : « 01_compil » « _ » « date de relève » « _ » « code lac ».

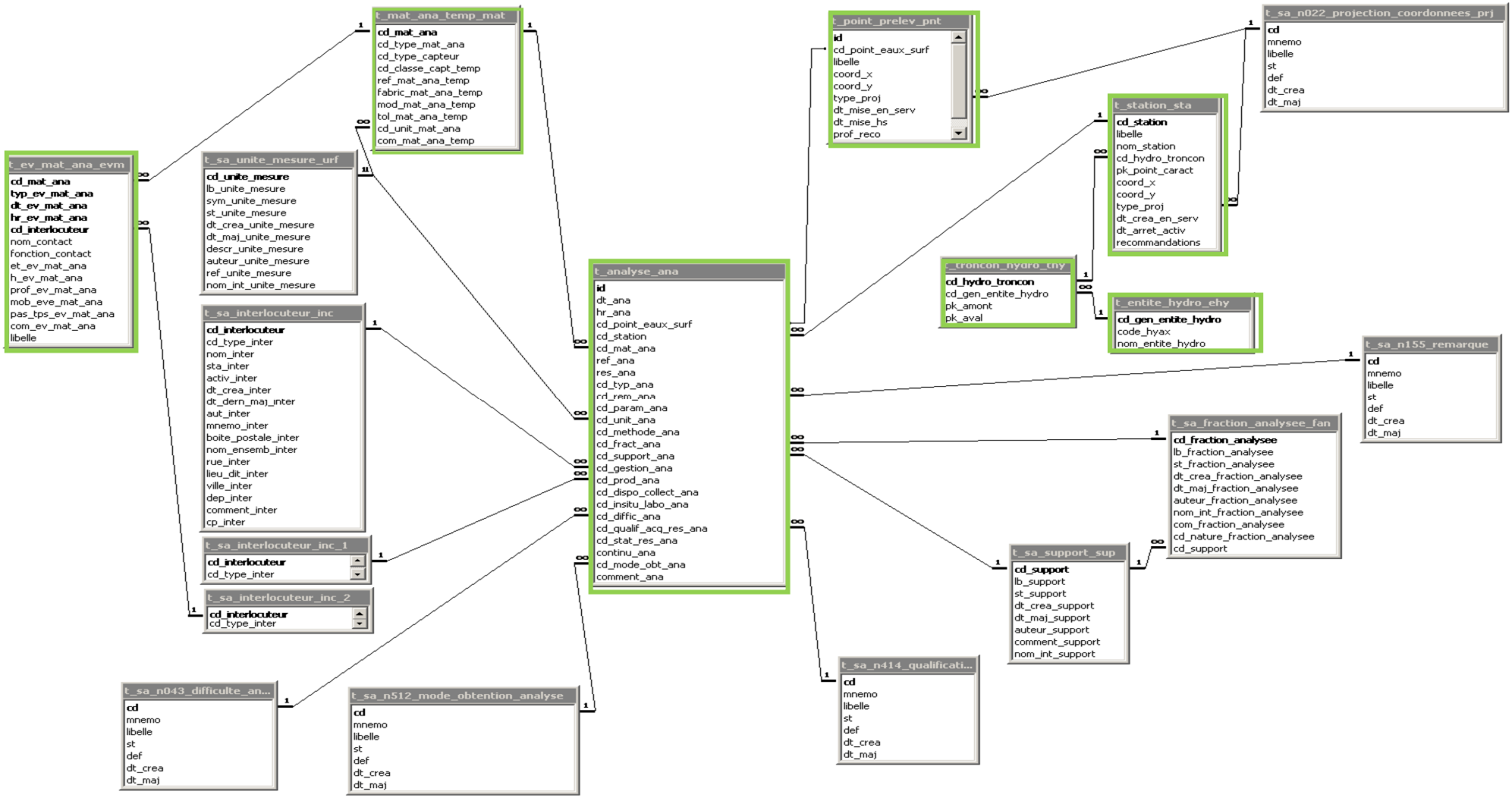


Figure 24. Architecture de la base thermie (en vert les tables à compléter avec les données recueillies)

Tableau 16. Description des champs des tables à remplir dans le cadre du réseau thermie lacustre

Table	Description table	Nom champ	Nature champ	Description champ
t_entite_hydro_ehy	table relative à l'entité hydrologique	cd_gen_entite_hydro	VARCHAR(8)	Code générique de l'entité hydrographique. Négatif = PAS SANDRE.
		code_hyax	VARCHAR(10)	Code HYAX = code lac ou code du cours d'eau.
		nom_entite_hydro	VARCHAR(127)	Nom principal de l'entité hydrographique.
t_troncon_hydro_thy	table relative au tronçon hydrologique	cd_hydro_troncon	VARCHAR(12)	Code hydrographique du tronçon pour les cours d'eau, ou code lac, pour les lacs.
		cd_gen_entite_hydro	VARCHAR(8)	Code générique de l'entité hydrographique à laquelle appartient ce tronçon. Négatif = PAS SANDRE.
		pk_amont	SINGLE	point kilométrique amont
		pk_aval	SINGLE	point kilométrique aval
t_station_sta	table relative à la station hydrologique	cd_station	VARCHAR(20)	Code de la station (code lac pour les lacs).
		libelle	VARCHAR(60)	Libellé (nom du lac).
		nom_station	VARCHAR(80)	Nom de la station: code lac_rt (rt= réseau thermie)
		cd_hydro_troncon	VARCHAR(12)	Code hydrographique du tronçon pour les cours d'eau, ou code lac, pour les lacs.
		pk_point_caract	SINGLE	PK du point caractéristique sur le tronçon de l'entité hydro
		coord_x	VARCHAR(20)	Coordonnée X principale.
		coord_y	VARCHAR(20)	Coordonnée Y principale.
		type_proj	VARCHAR(2)	Type de projection des coordonnées XY. ("26" = "Lambert 93", "31" = "WGS84G").
		dt_crea_en_serv	DATE_HEURE	Date de création de la station.
		dt_arret_activ	DATE_HEURE	Date d'arrêt d'activité de la station.
		recommandations	VARCHAR(255)	Recommandations sur le lieu
t_point_prelev_pnt	table relative aux points de prélèvement	id	NUMEROAUTO	Clef primaire autoincrémentée.
		cd_point_eaux_surf	VARCHAR(20)	Code du point de prélèvement: code lac_temp (pour mouillage thermie) ou codelac_pres (pour mouillage capteur pression)
		libelle	VARCHAR(255)	Libellé.
		coord_x	VARCHAR(20)	Coordonnée X principale.
		coord_y	VARCHAR(20)	Coordonnée Y principale.
		type_proj	VARCHAR(2)	Type de projection des coordonnées XY. ("26" = "Lambert 93", "31" = "WGS84G").
		dt_mise_en_serv	DATE_HEURE	Date de mise en service du point.
		dt_mise_hs	DATE_HEURE	Date de mise hors service du point.
		prof_reco	DOUBLE	Profondeur recommandée.
		recommandations	VARCHAR(255)	Recommandations sur le lieu
t_mat_ana_temp_mat	table relative au matériel d'analyse de température	cd_mat_ana	VARCHAR(25)	Code du matériel d'analyse (n° de série).
		cd_type_mat_ana	VARCHAR(2)	Code du type du matériel d'analyse. SA_N677.
		cd_type_capteur	VARCHAR(1)	Code du type du capteur de température. SA_N703.
		cd_classe_capt_temp	VARCHAR(1)	Classe du capteur température. SA_N702.
		ref_mat_ana_temp	VARCHAR(15)	Référence du matériel d'analyse (i.e. : n° de série).
		fabric_mat_ana_temp	VARCHAR(25)	Nom de l'établissement industriel fabriquant le matériel. Si possible, se rapprocher du SIRET.
		mod_mat_ana_temp	VARCHAR(20)	Modèle du matériel d'analyse.
		cd_unit_mat_ana	VARCHAR(3)	Code de l'unité de mesure. SA_URF.
		tol_mat_ana_temp	DOUBLE	Précision des mesures effectuées par la matériel d'analyse.

		com_mat_ana_temp	MEMO	Information complémentaire associée au matériel d'analyse.
t_ev_mat_ana_evm	table relative aux évènements du matériel d'analyse de température	cd_mat_ana	VARCHAR(25)	Code du matériel d'analyse.
		typ_ev_mat_ana	VARCHAR(1)	Type d'événement du matériel d'analyse. SA_N708.
		dt_ev_mat_ana	DATE_HEURE	Date de l'événement du matériel d'analyse.
		hr_ev_mat_ana	VARCHAR(50)	Heure de l'événement du matériel d'analyse.
		cd_interlocuteur	VARCHAR(14)	Code de l'interlocuteur créant l'événement. SA_INC.
		nom_contact	VARCHAR(50)	Nom de l'interlocuteur créant l'événement.
		fonction_contact	VARCHAR(50)	Fonction de l'interlocuteur créant l'événement.
		et_ev_mat_ana	VARCHAR(1)	Etat du matériel d'analyse. SA_N700.
		h_ev_mat_ana	DOUBLE	Hauteur du matériel d'analyse, altitude exprimée par la côte NGF.
		prof_ev_mat_ana	DOUBLE	Profondeur du matériel d'analyse. Exprimée en mètre.
		mob_eve_mat_ana	VARCHAR(1)	Mobilité du matériel d'analyse. SA_N707.
		pas_tps_ev_mat_ana	VARCHAR(1)	Pas de temps du matériel d'analyse. SA_N706.
		com_ev_mat_ana	MEMO	Commentaire de l'événement du matériel d'analyse.
		libelle	VARCHAR(12)	Libellé donné au matériel d'analyse lors de l'événement.
t_analyse_ana	table relative aux mesures enregistrées, comprend également les mesures environnementale ponctuelles (pH, température de l'air…)	id	NUMEROAUTO	Clef primaire autoincrémentée.
		dt_ana	DATE_HEURE	Date de l'analyse.
		hr_ana	DATE_HEURE	Heure de l'analyse.
		cd_point_eaux_surf	VARCHAR(20)	Code du point de prélèvement.
		cd_station	VARCHAR(20)	Code de la station hydrométrique.
		cd_mat_ana	VARCHAR(25)	Code du matériel d'analyse.
		ref_ana	VARCHAR(10)	Référence de l'analyse. Code affecté par le producteur de données à l'analyse pour l'identifier.
		res_ana	DOUBLE	Résultat de l'analyse.
		cd_typ_ana	VARCHAR(1)	Type d'analyse. SA_N699.
		cd_rem_ana	VARCHAR(2)	Code remarque de l'analyse. SA_N155.
		cd_param_ana	VARCHAR(5)	Code du paramètre mesuré. SA_PAR.
		cd_unit_ana	VARCHAR(3)	Code de l'unité de mesure. SA_URF.
		cd_methode_ana	VARCHAR(3)	Code de la méthode de la mesure. SA_MET.
		cd_fract_ana	VARCHAR(3)	Code de la fraction analysée. SA_FAN.
		cd_support_ana	VARCHAR(2)	Code du support analysé. SA_SUP
		cd_gestion_ana	VARCHAR(14)	Code du gestionnaire de l'analyse. SA_INC.
		cd_prod_ana	VARCHAR(50)	Code du producteur de l'analyse. SA_INC.
		cd_dispo_collect_ana	VARCHAR(10)	Code du réseau de mesure. SA_RSX.
		cd_insitu_labo_ana	VARCHAR(1)	Code de l'analyse, in situ/labo. SA_N156. (1 = "In situ")
		cd_diffic_ana	VARCHAR(1)	Code de la difficulté de l'analyse. SA_N43.
		cd_qualif_acq_res_ana	VARCHAR(1)	Code de la qualification du résultat de l'analyse. SA_N414.
		cd_stat_res_ana	VARCHAR(2)	Code du statut du résultat de l'analyse. SA_N446.
		continu_ana	BIT	Continuité de l'analyse. La première valeur d'une série est à "Non", les suivantes à "Oui".
		cd_mode_obt_ana	VARCHAR(2)	Mode d'obtention de l'analysé. SA_N512.
		comment_ana	MEMO	Commentaires.

2.3.2. Description des données de température

Le nom des **[**tables**]** est donné entre crochets. Des stations [t_station_sta] sont installées au sein de tronçons [t_troncon_hydro_thy] rattachés à une entité hydrographique [t_entite_hydro_ehy]. Au sein de ces stations sont installés des points de prélèvement [t_point_prelev_pnt]. Dans le cadre du réseau thermie, il existe au minimum un point de prélèvement par station, i.e. celui pour le mouillage des enregistreurs de température. Les résultats des analyses réalisées sur ces points de prélèvement sont archivés dans la table [t_analyse_ana]. Ils ont été obtenus à partir de matériels [t_mat_ana_temp_mat] déployés dans des conditions spécifiques [t_ev_mat_ana_evm].

Certaines tables apportent des informations redondantes [t_entite_hydro_ehy], [t_troncon_hydro_thy] et [t_station_sta] où le code lac est répété (Tableau 16). Cela vient du fait que la base est également utilisée pour des données issues de cours d'eau nécessitant cette hiérarchisation.

2.4. Visualisation des premières données : exemple sur le lac de Sainte Croix

Nous prenons comme exemple le lac de Sainte Croix pour lequel des données ont été déchargées un mois après la mise en place de la phase de test. La période de mesure débute le 22/06/2013 à 00h00 (UTC) et se termine le 31/07/20213 à 10h20 (UTC) (Figure 25).

La cote du lac au départ des enregistreurs est 474,95 m NGF. De la mise à l'eau du bateau au rangement du matériel après le terrain, 3 h se sont écoulées. Un total de 1h30 a été nécessaire pour décharger et reprogrammer les 27 sondes sur site. La déviance des sondes n'a pas été vérifiée.

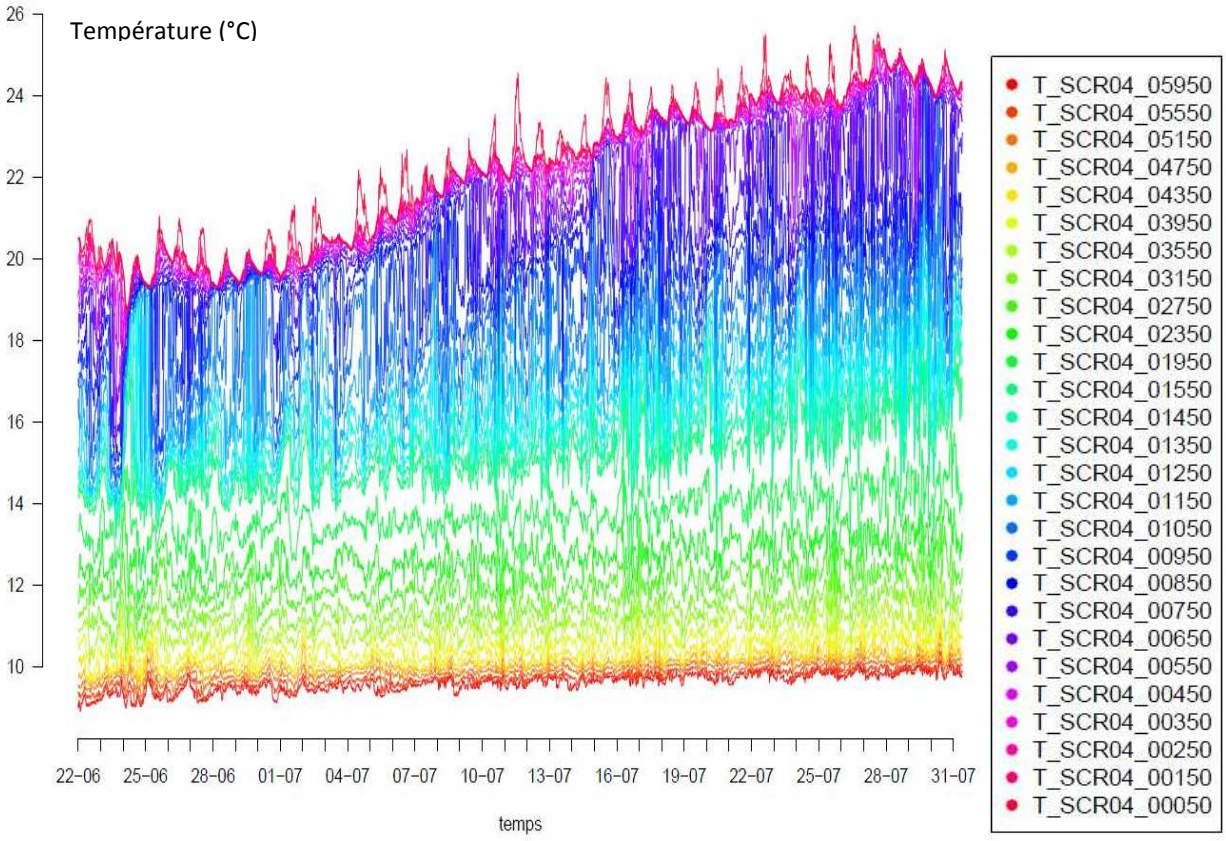


Figure 25. Températures observées sur le lac de Sainte Croix à différentes profondeurs entre le 22/06/2013 à 00h00 (UTC) et le 31/07/2013 à 10h00 (UTC)

3ème partie : Perspectives (2014-2015)

3.1. Bilan de la phase de test

Le bilan de la phase de test devrait permettre d'optimiser les solutions de mouillages, l'intervalle d'enregistrement, et le nombre de sondes à installer (cf. §3.2.) afin de préparer le développement du réseau à l'échelle nationale. Ce bilan devrait permettre d'avoir un retour d'expérience sur :

- la robustesse et les points de faiblesses des matériaux utilisés pour les solutions de mouillages ;

- la quantification de la dérive instrumentale ;

- la procédure de récupération des données et de leur archivage dans la base thermie au Pôle Plan d'Eau ;

- la vérification de la faisabilité logistique des interventions (décharge des données sur site, temps de mise en œuvre…).

La robustesse des mouillages face au vent et au courant peut être testée à l'aide d'un package *Maltlab* : Mooring Design & Dynamics (MDD) (Dewey, 1999). Cela n'a pas été évalué avant l'installation des mouillages car toutes les informations indispensables aux calculs (résistance, coefficient de trainée…) n'ont pu être collectées auprès des fournisseurs. Cependant, cette analyse pourra être effectuée en 2014 avant chaque campagne de terrain pour décharger les sondes sur les sites déjà équipés dans le but d'améliorer les mouillages si des points de ruptures potentiels sont détectés.

3.2. Choix du pas de temps d'enregistrement des mesures et de la répartition spatiale des sondes

Dans le cadre de la phase de test, nous avons volontairement choisi un pas d'enregistrement court, (i.e. toute les 15 min), et placé les sondes relativement proches les unes des autres (i.e. tous les mètres dans l'épilimnion). Or, il est nécessaire d'affiner ce choix en fonction de la précision des connaissances du fonctionnement thermodynamique des plans d'eau que doit fournir le réseau. En effet, selon les résolutions spatiales et temporelles des enregistrements de la température dans les plans d'eau, diverses caractéristiques du fonctionnement thermodynamique des plans d'eau pourront être quantifiées à des niveaux de précision variables. Les ordres de grandeurs de ces niveaux de précisions peuvent être évalués par l'analyse des données issues de la phase de test du protocole de suivi et ceci en sous-échantillonnant spatialement et/ou temporellement parmi les mesures.

De nombreuses variables décrivant les caractéristiques du fonctionnement thermodynamique des plans d'eau sont disponibles dans la littérature. Ces variables font l'objet de modélisation empirique dont les capacités prédictives dépendent de la précision des données de calibration potentiellement mesurées par le réseau de suivi pérenne.

Voici une liste non exhaustive de variables dont la sensibilité aux caractéristiques de l'échantillonnage pourra être étudiée (les références sont celles de modèles empiriques) :

- Durée de la période de production primaire, *i.e.* nombre de jour où la température de l'épilimnion est supérieure à 9°C (Håkanson and Boulion, 2001) ;

- Température moyenne annuelle de l'épilimnion (Ottosson and Abrahamsson, 1998; Ryanzhin, 1994) ;

- Durée de la période où la température de surface est inférieure à 4°C : période de mise en place d'une stratification thermique inverse dans le cas des plans d'eau DIMICTIQUE ;

- Durée de la période où la température de surface est supérieure à 4°C dans le cas du lac Pavé dont le fonctionnement a priori de type MONOMICTIQUE FROID ;

- Date de l'optimum thermique estival : date à laquelle la quantité de chaleur contenue dans la masse d'eau est à son maximum annuelle. Cette date permet d'évaluer le bilan de chaleur des plans d'eau et de comparer inter-annuellement des caractéristiques thermiques des plans d'eau comme la profondeur estivale de la thermocline, l'épaisseur de la couche de mélange...

- Date de l'optimum thermique hivernal : date à laquelle la quantité de chaleur contenue dans la masse d'eau est à son minimum annuelle. Cette date permet d'évaluer le bilan de chaleur des plans d'eau ;

- Profondeur de la thermocline à l'optimum thermique estival (Ambrosetti et al., 1996; Barbanti et al., 1996) ;

- Stabilité du profil de densité à l'optimum thermique estival ;

- Date de la prise en glace et date du dégel (Williams and Stefan, 2006) ;

- Date de mise en place de la stratification (Cahill et al., 2005; Demers and Kalff, 1993; Efremova, 2007) : date à partir de laquelle les échanges de masse (dissoutes) et d'énergie entre l'épilimnion et l'hypolimnion ne se font plus que très lentement par diffusion ;

- Date du retournement hivernal (Efremova, 2007) : date à laquelle les échanges de masse (dissoutes) et d'énergie entre l'épilimnion et l'hypolimnion se font rapidement par convection ;

- Epaisseurs de l'épilimnion et de l'hypolimnion à l'optimum thermique estival (Ambrosetti et al., 1996; Barbanti et al., 1996; Hanna, 1990) : grandeur souvent utilisée pour définir l'habitat thermique de nombreuses espèces; le volume de l'habitat des espèces d'eau froide étant à son minimum à la fin de l'été Clark et al. (2004) dans Cahill et al. (2005) ;

- Sa structure thermodynamique (Efremova and Pal'shin, 2003; Pal'shin et al., 2008) ;

- Stabilité de Schmidt (Idso, 1973) ;

- Temps de séjour effectif (Ottosson and Abrahamsson, 1998) en exploitant les données de température des rivières .

Ces analyses nécessitent de disposer d'au moins une année complète de mesures. A la suite de ces analyses, nous chercherons à optimiser les caractéristiques des mouillages afin d'étendre le réseau sur d'autres lacs à partir de 2015.

3.3. Evaluation de la représentativité du profil en continu par rapport à l'ensemble de la masse d'eau : cas de la retenue de Bimont

Dans le cadre du réseau thermie, le suivi de la température est concentré à une verticale à l'aplomb de la zone la plus profonde des plans d'eau avec comme hypothèse que la stratification verticale se répartie horizontalement de façon similaire sur l'ensemble du plan d'eau. Or, dans le cas particulier des lacs ayant un

court temps de séjour et/ou des berges très découpées, les hétérogénéités thermiques horizontales peuvent être importantes.

Par ailleurs, le premier thermomètre est placé à 50 cm sous la surface de l'eau. Ce choix arbitraire pourrait être réduit afin de permettre une comparaison plus directe des mesures in-situ aux observations satellitaires, i.e. la température dite de "peau" entre 3 et 100 µm (Simon, 2013).

Pour tester l'hypothèse de l'homogénéité horizontale de la structure verticale et pour évaluer le gradient vertical entre la surface et le premier thermomètre à 50cm, deux procédures ont été mise en place :

1) Gradient thermique de sub-surface

Pour quantifier les écarts de température entre la surface et 50 cm de profondeur un dispositif expérimental a été créé (Figure 26) pour suivre la température de l'eau en continu jusqu'à 55 cm et a été installé sur la retenue de Bimont entre le 15/05/2013 et le 18/05/2013.

Figure 26. Photo du dispositif pour suivre la température de surface sur le lac de Bimont (13) du 15/05/2013 à 00:00 (UTC) jusqu'au 04/06/2013 à 7:55 (UTC)

Description du dispositif

La flottabilité est assurée par un panneau de polystyrène sous lequel 4 bouées de mouillage classiques sont accrochées et reliées entre elles par des tubes en pvc. Le dispositif est composé de 10 sondes : la première, fixe, prend la température de l'air, la seconde est mobile pour mesurer la température à la surface, les autres sondes sont fixes sur le câble et sont réparties à 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, 35 cm, 45 cm et 55 cm sous la surface à l'aide de tube pvc. Les sondes sont attachées sur un câble en inox. Ce dispositif a été relié à la bouée servant pour le mouillage thermie.

Premiers résultats

La Figure 27 présente les données issues des enregistreurs de températures et met en évidence que le gradient entre les différents enregistreurs dans l'eau n'est pas très marqué. Par exemple, la différence entre la sonde de surface et celle à 55 cm n'excède pas les 0.2 °C qui est la précision des sondes, ce qui est certainement lié aux conditions très venteuse durant la période de mesure. Pour statuer sur la présence d'un gradient, il est nécessaire de refaire l'expérience sur une période beaucoup plus longue avec des sondes plus précises et des conditions non venteuses.

Ces mesures devraient nous permettre de connaitre l'ordre de grandeur des écarts de température entre la température de peau satellitaire et la température à 50cm. Un ajustement de la position du premier thermomètre est envisagé dans le cas d'un fort gradient de subsurface.

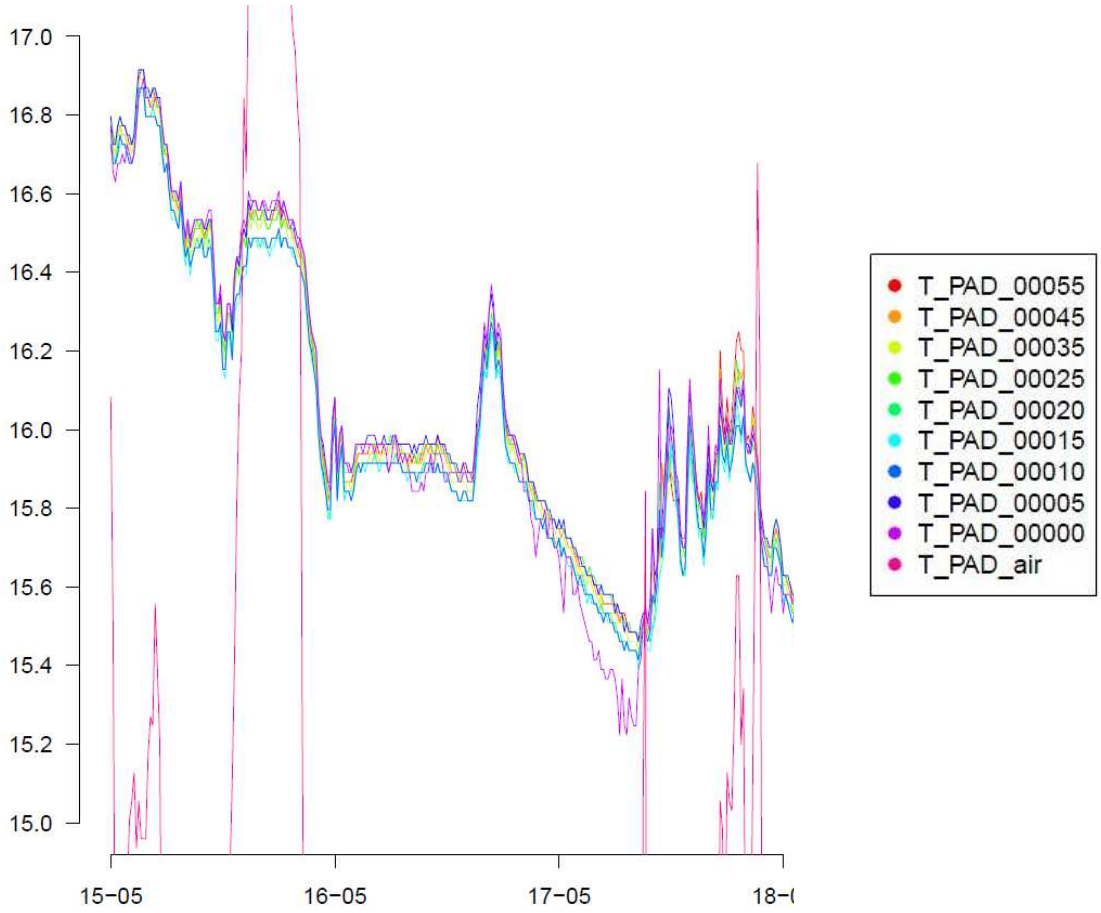


Figure 27. Présentation des données de température de surface en continu sur le lac de Bimont (13).

2) Représentativité de la température de la colonne d'eau entre le profil en continu et l'ensemble du lac

Pour répondre à cette question, des profils ponctuels seront réalisés en différents point des plans d'eau lors de la récupération des données enregistrées et dans la mesure du possible.

Par exemple, la Figure 28 présente des profils de température réalisés manuellement en 4 points du plan d'eau lors d'une campagne de suivi d'octobre 2013. La figure montre que le profil "Pompe", le moins profond et le plus proche de la zone de turbinage amont, est caractérisé par des différences nettes de température comparé aux autres profils et en particulier au profil "Barrage" où a été installé la chaine de thermistors (profil "bouée profil continu"). Ces données montrent également une variabilité spatiale important sur les premiers mètres de profondeur.

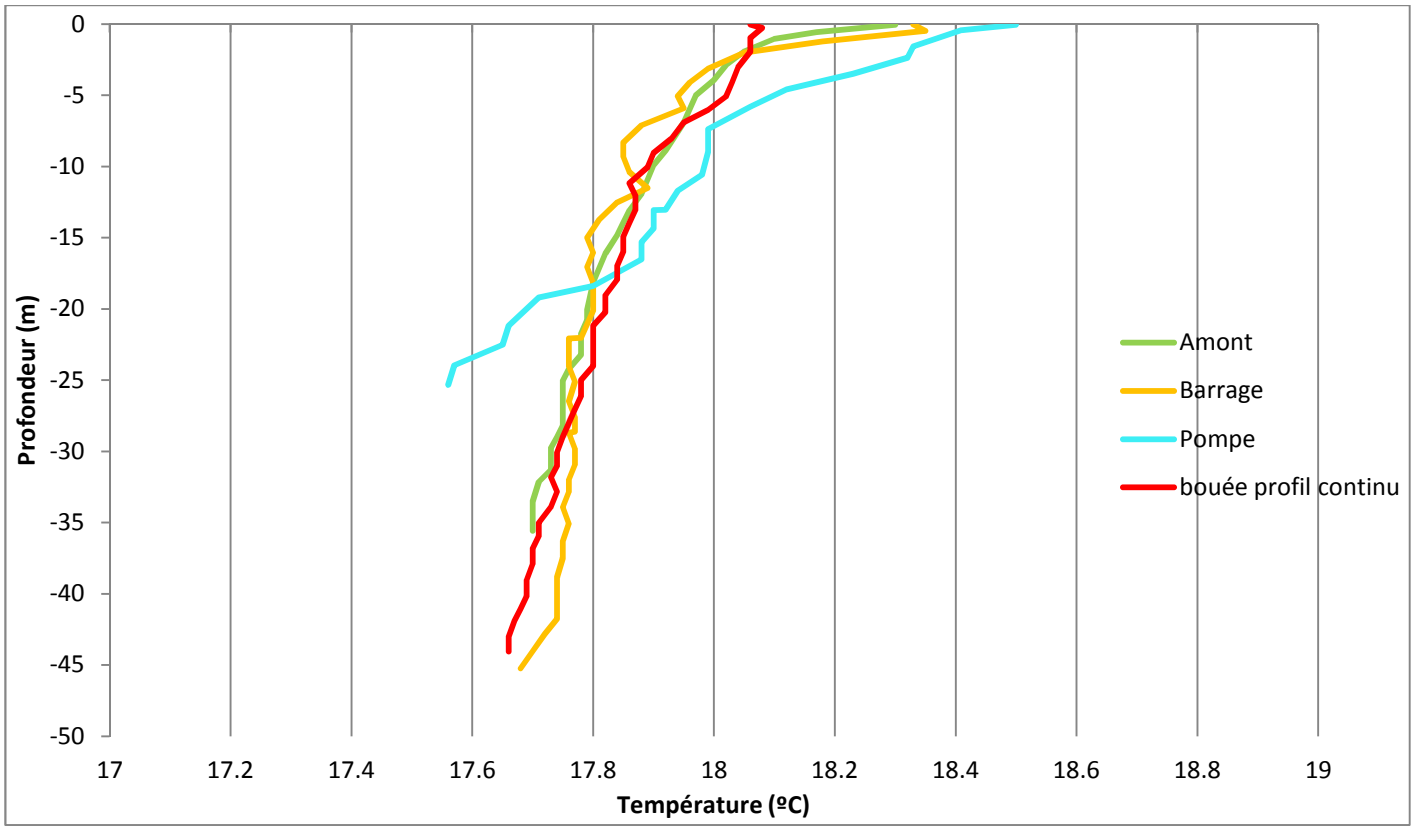


Figure 28. Profils de température réalisés sur le lac de Bimont le 09/10/2013 (d'après Jordi PRATS)

Les analyses complémentaires des profils ponctuels, des suivis en continu et des données satellitaires permettront donc de préciser les caractéristiques du protocole de suivi pérenne de température.

Conclusion

Face à un manque manifeste de données en continu de la température des plans l'eau nationaux et au vu des impacts potentiels du changement climatique sur ces systèmes, l'ONEMA a initié dès 2009 une réflexion sur la création d'un réseau de mesures thermiques en plans d'eau. Cela s'est traduit, en 2013, par la réalisation d'une phase de test in situ de solutions de mouillage sur 9 lacs.

Ce rapport technique détaille les protocoles mise en place durant cette phase de test : matériel, coût, méthodologie, validation et centralisation des données. Il présente aussi quelques données déjà acquises et quelques propositions de perspectives pour 2014-2015. En particulier, l'analyse des données recueillies sur les sites pilotes permettra, d'améliorer les solutions de mouillages présentées dans ce document en termes de positionnement spatial, de pas de temps d'enregistrement des sondes, de répartition le long de la colonne… Suite à ces ajustements, le réseau pourra être lancé à l'échelle nationale après 2015.

Ce réseau, à plus ou moins longue échéance, apportera des informations qui pourront aussi bien servir à la recherche (e.g. connaissance, modélisation...) et aux gestionnaires (i.e. adaptation des modes piscicole en fonction des tendances d'évolution des conditions thermiques…).

Bibliographie

Adams M. (2013) Protocol for Placement and Retrieval of Temperature Data Loggers in Idaho Streams, Water Quality Monitoring Protocols, Idaho Department of Environmental Quality. pp. 31.

Adrian R., O'Reilly C.M., Zagarese H., Baines S.B., Hessen D.O., Keller W., Livingstone D.M., Sommaruga R., Straile D., Van Donk E., Weyhenmeyer G.A., Winder M. (2009) Lakes as sentinels of climate change. Limnology and Oceanography 54:2283-2297. DOI: 10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2283.

Ambrosetti W., Barbanti L., Pompilio L. (1996) Morphometry and thermal stratification in Italian lakes. 3. Dynamics of the deepening of thermocline. Memorie - Istituto Italiano di Idrobiologia 54:43-50.

Barbanti L., Pompilio L., Ambrosetti W. (1996) Morphometry and thermal stratification in Italian lakes. 2. The 'depth ratio' as a predictive index of thermal structures. Memorie - Istituto Italiano di Idrobiologia 54:31-42.

Bayer T.K., Burns C.W., Schallenberg M. (2013) Application of a numerical model to predict impacts of climate change on water temperatures in two deep, oligotrophic lakes in New Zealand. Hydrobiologia 713:53-71. DOI: 10.1007/s10750-013-1492-y.

Boehrer B., Schultze M. (2008) Stratification of lakes. Reviews of Geophysics 46.

Cahill K.L., Gunn J.M., Futter M.N. (2005) Modelling ice cover, timing of spring stratification, and end-of-season mixing depth in small Precambrian Shield lakes. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 62:2134-2142.

Clark B.J., Dillon P.J., Molot L.A. (2004) Lake trout (Salvelinus namaycush) habitat volumes and boundaries in Canadian Shield lakes Boreal Shield Waters: Lake Trout Ecosystems in a Changing Environment, in: L. Publishers (Ed.), Boreal Shield Waters: Lake Trout Ecosystems in a Changing Environment. pp. 111-117.

Danis P.A., von Grafenstein U., Masson-Delmotte V., Planton S., Gerdeaux D., Moisselin J.M. (2004) Vulnerability of two European lakes in response to future climatic changes. Geophysical Research Letters 31.

Demers E., Kalff J. (1993) A simple-model for predicting the date of spring stratification in temperate and subtropical lakes. Limnology and Oceanography 38:1077-1081.

DeStasio B.T., Hill D.K., Kleinhans J.M., Nibbelink N.P., Magnuson J.J. (1996) Potential effects of global climate change on small north-temperate lakes: Physics, fish, and plankton. Limnology and Oceanography 41:1136-1149.

Dewey R.K. (1999) Mooring Design & Dynamics—a Matlab® package for designing and analyzing oceanographic moorings. Marine Models 1:103-157. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/S1369-9350(00)00002-X.

Efremova T.V. (2007) Effect of climate and morphometry on thermal regime of lakes, 16th International Northern Research Basins Symposium and Workshop, Petrozavodsk, Russia, 27 Aug.-2 Sept. 2007.

Efremova T.V., Pal'shin N.I. (2003) Formation of vertical thermal structure in lakes in Northwestern Russia and Finland. Water Resources 30:640-649.

Håkanson L., Boulion V.V. (2001) A practical approach to predict the duration of the growing season for European lakes. Ecological Modelling 140:235-245.

Hanna M. (1990) Evaluation of Models Predicting Mixing Depth. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 47:940-947.

Heggen R.J. (1983) Thermal dependent physical properties of water. Journal of Hydraulic Engineering - ASCE 109:298-302.

Idso S.B. (1973) On the concept of lake stability. Limnology Oceanography 18:681-683.

Livingstone D.M. (2003) Impact of secular climate change on the thermal structure of a large temperature central European lake. Climatic Change 57:205-225.

Livingstone D.M. (2008) A change of climate provokes a change of paradigm: Taking leave of two tacit assumptions about physical lake forcing. International Review of Hydrobiology 93:404-414.

Ottosson F., Abrahamsson O. (1998) Presentation and analysis of a model simulating epilimnetic and hypolimnetic temperatures in lakes. Ecological Modelling 110:233-253.

Pal'shin N.I., Efremova T.V., Potakhin M.S. (2008) The effect of morphometric characteristics and geographic zonality on thermal stratification of lakes. Water Resources 35:191-198.

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

Rondel C., Daufresne M., Danis P.-A. (2011) Réflexion sur la mise en place d'un réseau de mesure thermique en plans d'eau

Convention Onema/Cemagref:45.

Ryanzhin S.V. (1994) Latitudinal-altitudinal inter-relationships for the surface temperatures of the Northern Hemisphere freshwater lakes. Ecological Modelling 74:231-253.

Sahoo G.B., Schladow S.G., Reuter J.E., Coats R. (2011) Effects of climate change on thermal properties of lakes and reservoirs, and possible implications. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment 25:445-456.

SANDRE. (2013) Description des données relatives à l'acquisition des mesures physiques de température en continu, in: Sandre (Ed.).

Simon R.N. (2013) Télédétection de paramètres physico-chimiques et biologiques de plans d'eau: Etat de l'art & étude de cas sur la température de surface, ONEMA Irstea. pp. 68.

Sowder C., Steel E.A. (2012) A Note on the Collection and Cleaning of Water Temperature Data. Water 4:597-606. DOI: 10.3390/w4030597.

Williams S.G., Stefan H.G. (2006) Modeling of lake ice characteristics in North America using climate, geography, and lake bathymetry. Journal of Cold Regions Engineering 20:140-167.

Annexes

Annexe 1. Note pour calculer la hauteur d'enfoncement des bouées Rotax Marine

Annexe 2. Script R pour vérifier la déviance des mesures des enregistreurs de température

Annexe 3. Exemple de sauvegarde des écrans de programmation et d'état des sondes avec le logiciel *Hoboware*

Annexe 4. Script pour décharger les enregistreurs sur le terrain

Annexe 5. Proposition d'une fiche pour les campagnes de terrain dans le cadre du réseau thermique lacustre

Annexe 6. Comparaison des tarifs entre plusieurs entreprises des divers éléments nécessaires à la fabrication des mouillages et des informations telles que la flottabilité maximale des bouées[1] (Flot. Max) ou la charge de rupture[2] (CR) (en bleu les éléments choisis pour les mouillages)

Annexe 7. Proposition technique et commerciale pour un système de mesure en profil dans les lacs par la société NKE Instrumentation

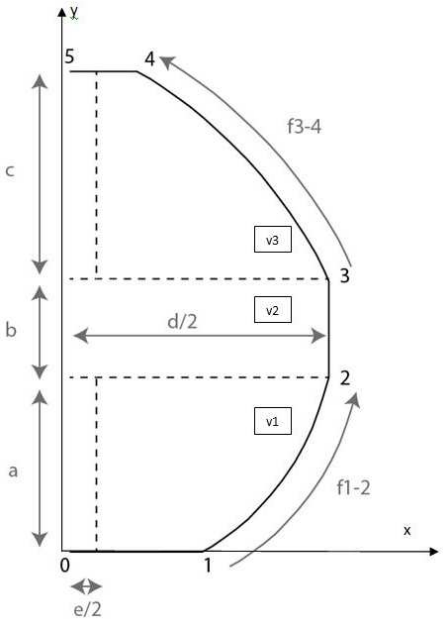
Annexe 8. Template *Excel* pour calculer la masse (MT) et le volume(Vol) des éléments du mouillage thermie : cas du lac du Salagou (en italique, les éléments du corps mort non pris en compte dans le calcul car ils reposent sur le fond, les informations permettent de calculer les quantités)

Annexe 9. Quantité des éléments nécessaires à la réalisation des mouillages sur les sites pilotes

Annexe 10. Note informative envoyée lors des demandes d'autorisations auprès des gestionnaires et/ ou des propriétaires (le schéma du mouillage a été mis à jour depuis la rédaction de cette note cf. 1ère partie)

Annexe 1. Note pour calculer la hauteur d'enfoncement des bouées Rotax Marine

Calcul des volumes des bouées



Le volume total d'une bouée Rotax Marine est décomposé en 3 volumes numérotés du bas vers le haut avec v2 volume du cylindre percé de la partie intermédiaire (diamètre extérieur d et diamètre intérieur e)

$$V = V1 + V2 + V3$$

On note:

$$f_{1-2}(y) \; et \; f_{3-4}(y)$$

les fonctions qui décrivent les courbes de la bouée, l'utilisation du théorème de Leibniz permettra de calculer leurs volumes de révolution.

Nous avons effectué un ajustement par des polynômes de degré 4 de ces fonctions en utilisant les tracés des plans du constructeur qui nous ont aussi permis de mesurer les quantités a,b,c,d,e

$$f(y) = \alpha y^4 + \beta y^3 + \gamma y^2 + \delta y + \varepsilon$$

Les volumes peuvent alors être calculés par :

$V1 = \pi \int_0^a [f_{1-2}(y)]^2 dy \quad - \pi * (e/2)^2 * a$

$$V2 = \pi * (d/2)^2 * b \quad - \pi * (e/2)^2 * b$$

$$V3 = \pi \int_0^c [f_{3-4}(y)]^2 dy \quad - \pi * (e/2)^2 * c$$

Pour les volumes V1 et V2 si l'on utilise la notation $[f(y)]^2 = \sum_{i=0}^{i=8} M_i y^i$ les primitives obtenues sont de la forme:

$$F(y) = \sum_0^8 M_i \frac{y^{i+1}}{i+1} + C$$

et les coefficients Mi peuvent être calculés par :

$$M_0 = \varepsilon^2$$
$$M_1 = 2\delta\varepsilon$$
$$M_2 = 2\gamma\varepsilon + \delta^2$$
$$M_3 = 2\gamma\delta + 2\beta\varepsilon$$
$$M_4 = 2\alpha\varepsilon + 2\beta\delta + \gamma^2$$
$$M_5 = 2\beta\gamma + 2\alpha\delta$$

$$M_6 = 2\alpha\gamma + b\beta^2$$
$$M_7 = 2\alpha\beta$$
$$M_8 = \alpha^2$$

On a donc :

$$V1 = \pi[F_{1-2}(y)]_0^a - \pi * (e/2)^2 * a$$
$$V3 = \pi[F_{3-4}(y)]_0^c - \pi * (e/2)^2 * c$$

Calcul des profondeurs d'immersions des bouées

Compte tenu de son poids et des dispositifs fixés sous elle, une bouée Rotax Marine va s'enfoncer d'une profondeur d'immersion hi que nous allons calculer.

Le volume immergé Vi en [l]se calcule en utilisant le théorème d'Archimède. Si nous utilisons les notations : MBR la masse de la bouée en [kg], MA la masse résultante en [kg] des dispositifs fixés non compensée par la poussée d'Archimède de leurs volumes ; en considérant que l'on a une densité de l'eau telle que 1 litre d'eau à une masse de 1 kg nous obtenons l'équation suivante :

Vi = MBR +MA

si le modèle de bouée à été choisi judicieusement ce volume est inférieur au volume total (Vi<V) et la bouée flotte, les calculs peuvent donc être effectués.

Nous avons alors trois cas de figures:

- 1) Vi<V1 :

on détermine directement hi vérifiant

$$Vi - \{\pi[F_{1-2}(y)]_0^{hi} - \pi * (e/2)^2 * hi\}$$
$$0 = g_{1-2}(hi)$$

- 2) V1<Vi<V1 +V2:

on détermine directement h vérifiant

$$Vi - V1 = \pi * (d/2)^2 * h - \pi * (e/2)^2 * h$$
$$h = \frac{Vi - V1}{\pi * [(d/2)^2 - (e/2)^2]}$$

puis on calcule hi=h+a

- 3) V1+V2<Vi<V1 +V2+V3:

on détermine directement h vérifiant

$$Vi - V1 - V2 - \{\pi[F_{3-4}(y)]_0^h - \pi * (e/2)^2 * h\} = 0 = g_{3-4}(h)$$

puis on calcule hi=h+a+b

Dans les cas 1) et 3) on effectue un calcul au mm prés en faisant varier respectivement:

1) hi de 0 à a
3) h de 0 à c

en effectuant un calcul tous les mm jusqu'au changement de signe de la quantité calculée puis en effectuant une interpolation linéaire sur ces deux dernières quantités calculées pour approximer le zéro de la fonction $g_{1-2}(hi)$ ou $g_{3-4}(h)$..

<u>Remarques</u>

Les coefficients des fonctions f_{1-2} (y) et f_{3-4} (y) on été déterminé à l'aide de scripts R, les autres calculs ont été effectués à l'aide de macros *Excel*.

Annexe 2. Script R pour vérifier la déviance des mesures des enregistreurs de température

Les données mesurées par chaque enregistreur sont conservées dans un fichier « *.txt* », il est donc possible de compiler ces données dans un même fichier pour réaliser une analyse globale.

1. Import des fichiers *txt* sous un même fichier

```
import = function (path) {
  x = substr(basename(path), 1, nchar(basename(path)) - 4)
  infos = readLines(path, 4)
  titreTrace = sub("\"", "", strsplit(infos[1], ": ")[[1]][2])

  if (length(infos) > 3) {

    value = read.table(path, h = F, sep = ";", skip = 3, dec = ",")[, 2:4]
    colnames(value) = c("date", "heure", paste("T", titreTrace, sep = "_"))
    value$'heure' = substr(value$'heure', 1, 8)

    value$'dateheure' <- strptime(paste(value$'date', value$'heure') , "%d/%m/%Y
%H:%M:%S")

    if (nrow(value) > 0) value else NULL
    } else NULL
  }

merge.capt = function(donnees) {

    X = donnees[[1]]
    for (i in names(donnees)[-1]) {
      X = merge(X, donnees[[i]], all = T)
     }
    X
    }

sourceWD =
"//datafile.aix.cemagref.fr/Partage/HYAX/Hyax_Travail/Reseau_thermie_Lac_ONEMA/la
c/Test thermos/20130726"   ##modifier le chemin si différent
fichiers = dir(sourceWD, pattern = ".txt", full.name = T)
LOAD = lapply (fichiers, import)
names(LOAD) = substr(basename(fichiers), 1, nchar(basename(fichiers)) - 4)
LOAD = LOAD[!sapply(LOAD, is.null)]
temp_test = merge.capt(LOAD)
exportWD =
"//datafile.aix.cemagref.fr/Partage/HYAX/Hyax_Travail/Reseau_thermie_Lac_ONEMA/la
c/Test thermos/20130726/Analyses_R"      ##modifier le chemin si différent
path_exp = paste(exportWD, "/compil_test", Sys.Date(), ".txt", sep = "")
write.table(temp_test, path_exp, sep = ";", row.names = F, quote = F)
save(temp_test, file = sub(".txt", ".RData", path_exp))
```

Une fois les données compilées, il est possible d'analyser les déviances des mesures par rapport à la moyenne pour un temps donné.

2. Vérification de la déviance des sondes

```
#chargement du fichier précédemment compilé
load("//datafile.aix.cemagref.fr/Partage/HYAX/Hyax_Travail/Reseau_thermie_Lac_ONE
MA/lac/Test thermos/20130726/Analyses_R/compil_test2013-07-26.RData")# mettre le
bon chemin d'accès si différent
```

```
temp_test$mean <- rowMeans(temp_test[,4:ncol(temp_test)],na.rm=F,dim=1) # calcul de la moyenne par ligne
lengthT<-length(which (substr(colnames(temp_test),1,1)=="T")) # nombre de colonnes commançant par T
deviance <-sapply (temp_test[which (substr(colnames(temp_test),1,1)=="T")],function(x){ x-temp_test$mean}) # calcul de la déviance (valeur de la température-valeur de la moyenne)
colnames (deviance) <- paste("d_",colnames(temp_test)[which (substr(colnames(temp_test),1,1)=="T")],sep="")  # ajout de la lettre d devant les noms de colonnes pour la déviances de chaque
temp_test <- cbind(temp_test,deviance) # ajout des colonnes de déviances au data frame

# Export du data frame avec la moyenne et la déviance par rapport à la moyenne
exportWD = "//datafile.aix.cemagref.fr/Partage/HYAX/Hyax_Travail/Reseau_thermie_Lac_ONEMA/lac/Test thermos/20130726/Analyses_R"
path_exp = paste(exportWD, "/temp_test_déviance", Sys.Date(), ".txt", sep = "")
write.table(temp_test,path_exp, sep = ";", row.names = F, quote = F)
```

Extrait du data frame avec les valeurs des températures et les déviances à la moyenne

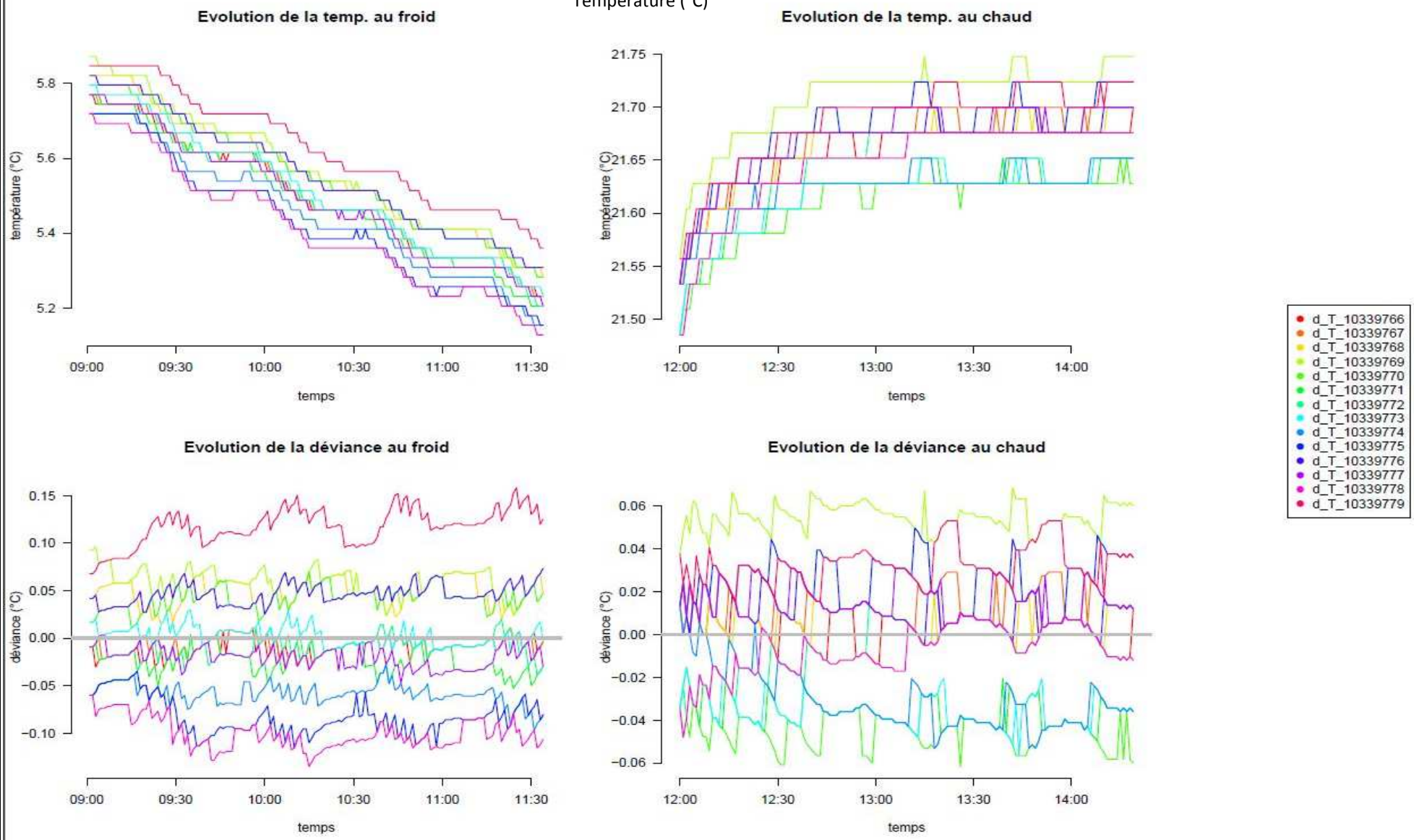
date	heure	dateheure	T_10339715	T_10339742	mean	d_T_10339715	d_T_10339742
26/07/2013	09:01:00	26/07/2013 09:01	6.408	6.102	6.1308	0.2772	-0.0288
26/07/2013	09:02:00	26/07/2013 09:02	6.357	6.077	6.1196	0.2374	-0.0426
…	…	…	…	…	…	…	…

```
# Séparation du jeu de données selon les heures des tests au froid et à température ambiante
temp_test_froid <- subset (temp_test,heure > "09:00" & heure <"10:50")
#mettre les bonnes heures
temp_test_ambiant <- subset (temp_test,heure > "11:15" & heure <"12:55")
#mettre les bonnes heures

 # Création d'un document pdf avec les graphiques des températures et des déviances selon les deux tests

pdf("tests_thermos.pdf", w = 12, h = 8, useDingbats = F)
layout (matrix(c(1,2,3,4,5,5),2,3, byrow = F),widths = c(2,2,1))

# graphique de la température ~ temps pour le test au froid
 plot (range(temp_test_froid$dateheure), range(temp_test_froid[which (substr(colnames(temp_test_froid),1,1)=="T")], na.rm = T),
   type = "n", las = 1, bty = "n", xlab = "", ylab = "", main="Evolution de la temp. au froid")

colonnesT = names(temp_test_froid)[which (substr(colnames(temp_test_froid),1,1)=="T")]
coul = rainbow(length(colonnesT))
names(coul) = colonnesT

for(i in colonnesT) {
  lines(temp_test_froid$dateheure, temp_test_froid[, i], col = coul[i])
  } # boucle pour tracer les courbes de chaque sonde
# graphique des déviances ~ temps pour le test au froid
 plot (range(temp_test_froid$dateheure), range(temp_test_froid[which (substr(colnames(temp_test_froid),1,2)=="d_")], na.rm = T) ,
  type = "n", las = 1, bty = "n", xlab = "", ylab = "", main="Evolution de la déviance au froid")
```

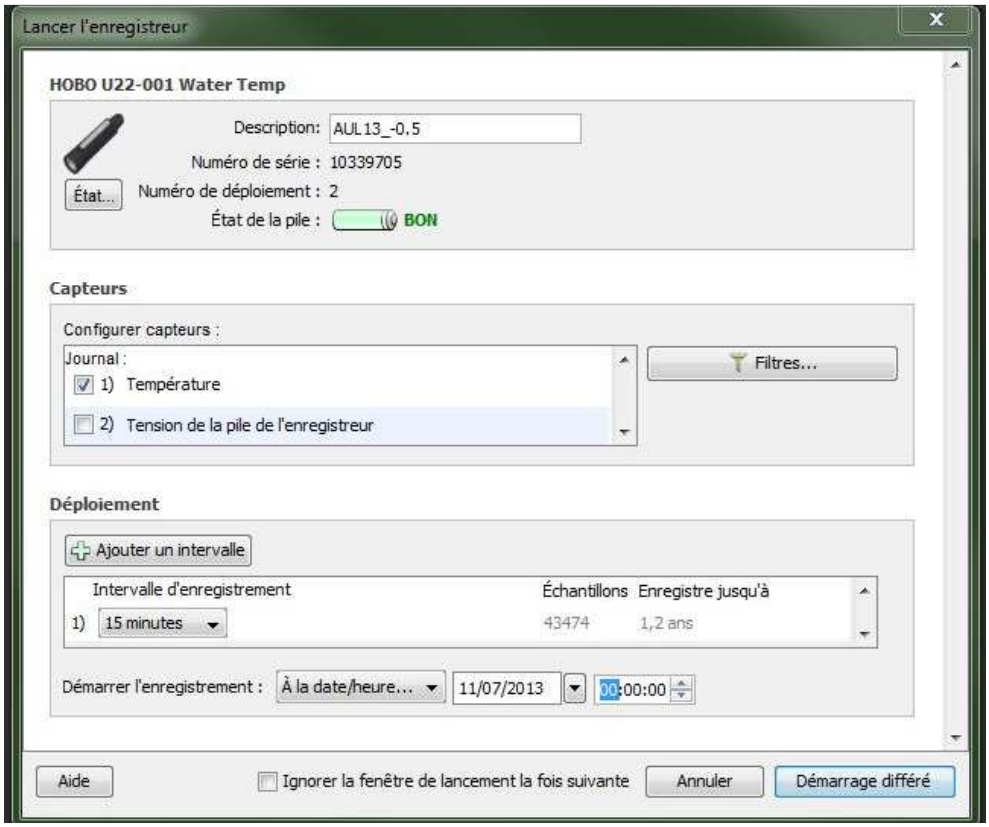
```
colonnesD = names(temp_test_froid)[which
(substr(colnames(temp_test_froid),1,2)=="d_")]
coul = rainbow(length(colonnesD))
names(coul) = colonnesD

for(i in colonnesD) {
  lines(temp_test_froid$dateheure, temp_test_froid[, i], col = coul[i])
  }

  abline (h = 0, lwd = 2, col = 8)

# graphique de la température ~ temps pour le test à température ambiante

    plot (range(temp_test_ambiant$dateheure), range(temp_test_ambiant[which
(substr(colnames(temp_test_ambiant),1,1)=="T")], na.rm = T),
     type = "n", las = 1, bty = "n", xlab = "", ylab = "", main="Evolution de la
temp. au chaud")

colonnesT = names(temp_test_ambiant)[which
(substr(colnames(temp_test_ambiant),1,1)=="T")]
coul = rainbow(length(colonnesT))
names(coul) = colonnesT

for(i in colonnesT) {
  lines(temp_test_ambiant$dateheure, temp_test_ambiant[, i], col = coul[i])
  }

# graphique des déviances ~ temps pour le test à température ambiante
  plot (range(temp_test_ambiant$dateheure), range(temp_test_ambiant[which
(substr(colnames(temp_test_ambiant),1,2)=="d_")], na.rm = T),
  type = "n", las = 1, bty = "n", xlab = "", ylab = "", main="Evolution de la
déviance au chaud")

colonnesD = names(temp_test_ambiant)[which
(substr(colnames(temp_test_ambiant),1,2)=="d_")]
coul = rainbow(length(colonnesD))
names(coul) = colonnesD

for(i in colonnesD) {
  lines(temp_test_ambiant$dateheure, temp_test_ambiant[, i], col = coul[i])

  }

  abline (h = 0, lwd = 2, col = 8)

# ajout de la légende
xleg <- rep(c(0),c(lengthT))
yleg <- c(1:lengthT)
plot (xleg, yleg, axes = F, type = "n", xlab = "", ylab = "")
legend('center', names(coul), pch = 19, col = coul, horiz = F, cex = 1, ncol =1)

 dev.off()
```

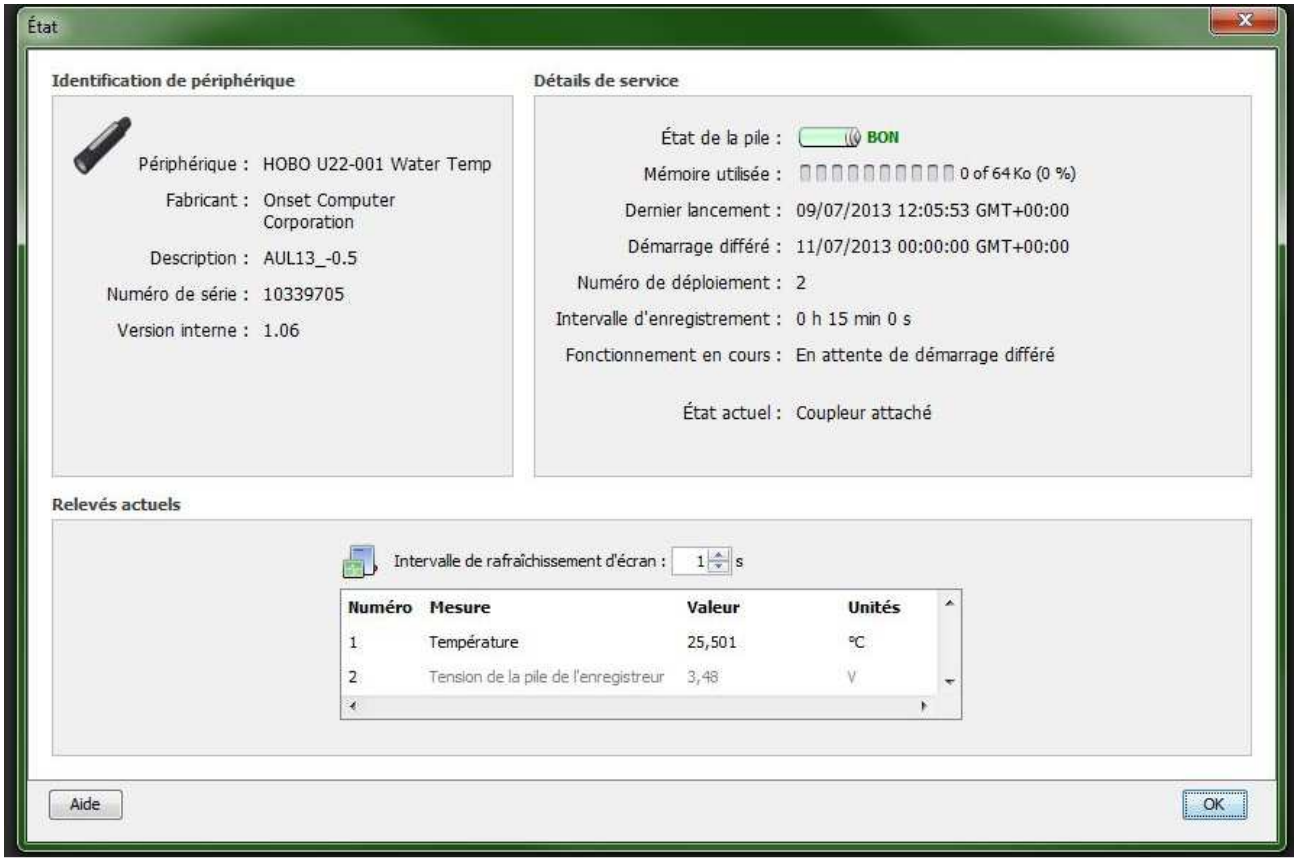
La figure ci-dessous présente les sorties graphiques que l'on obtient après application du script dans R.

Température (°C)



Annexe 3. Exemple de sauvegarde des écrans de programmation et d'état des sondes avec le logiciel *Hoboware*





Annexe 4. Script pour décharger les enregistreurs sur le terrain

1. Import des fichiers txt sous un même fichier

```
import = function (path) {

  x = substr(basename(path), 1, nchar(basename(path)) - 4)

  infos = readLines(path, 4)
  titreTrace = sub("\"", "", strsplit(infos[1], ": ")[[1]][2])

  if (length(infos) > 3) {

    value = read.table(path, h = F, sep = ";", skip = 3, dec = ",")[, 2:4]
    colnames(value) = c("date", "heure", paste("T", titreTrace, sep = "_"))
    value$'heure' = substr(value$'heure', 1, 8)      #enlever ",0" à l'heure

    value$'dateheure' <- strptime(paste(value$'date', value$'heure') , "%d/%m/%Y
%H:%M:%S")

    if (nrow(value) > 0) value else NULL

    } else NULL

  }
merge.capt = function(donnees) {

    X = donnees[[1]]
    for (i in names(donnees)[-1]) {
      X = merge(X, donnees[[i]], all = T, sort = F)
      }
    X

    }

sourceWD =
"//datafile.aix.cemagref.fr/Partage/HYAX/Hyax_Travail/Reseau_thermie_Lac_ONEMA/la
c/Sainte Croix/déchargement sonde/20130731"   #modifier le chemin si différent
fichiers = dir(sourceWD, pattern = ".txt", full.name = T)
fichiers = fichiers[order(as.numeric(sapply(strsplit(sub('.txt', '',
basename(fichiers)), "_"), tail, 1)), decreasing = T)]
LOAD = lapply (fichiers, import)
names(LOAD) = substr(basename(fichiers), 1, nchar(basename(fichiers)) - 4)
LOAD = LOAD[!sapply(LOAD, is.null)]

temp_SCR04 = merge.capt(LOAD)

exportWD =
"//datafile.aix.cemagref.fr/Partage/HYAX/Hyax_Travail/Reseau_thermie_Lac_ONEMA/la
c/Sainte Croix/déchargement sonde/20130731/Analyses_R"      #modifier le chemin
si différent
path_exp = paste(exportWD, "/compil_SCR04_", Sys.Date(), ".txt", sep = "")
write.table(temp_SCR04, path_exp, sep = ";", row.names = F, quote = F)
save(temp_SCR04, file = sub(".txt", ".RData", path_exp))
```

Une fois les données compilées, il est possible d'analyser de comparer sur un même graphique l'ensemble des sondes.

2. Analyse du fichier compilé

```
#chargement du fichier précédemment compilé
load("//datafile.aix.cemagref.fr/Partage/HYAX/Hyax_Travail/Reseau_thermie_Lac_ONEMA/lac/Sainte Croix/déchargement sonde/20130731/Analyses_R/compil_SCR04_2013-08-01.RData") ##modifier le chemin si différent

# découpage du jeu de données avec la date/heure de sortie de l'eau du dispositif
temp_SCR04_val <- subset (temp_SCR04, dateheure < strptime("31/07/2013 10:00", "%d/%m/%Y %H:%M"))      #mettre les bonnes heures


# export du data frame obtenu après découpage
exportWD = "//datafile.aix.cemagref.fr/Partage/HYAX/Hyax_Travail/Reseau_thermie_Lac_ONEMA/lac/Sainte Croix/déchargement sonde/20130731/Analyses_R"  ##modifier le chemin si différent
path_exp = paste(exportWD, "/temp_SCR04_val", Sys.Date(), ".txt", sep = "")
write.table(temp_SCR04, path_exp, sep = ";", row.names = F, quote = F)

# graphique des températures au cours du temps selon la profondeur (ici non prise en compte du changement de niveau d'eau)
    pdf("graph_temp_prof_SCR04.pdf", w = 12, h = 8, useDingbats = F)
layout (matrix(c(1,2),1,2, byrow = F),widths = c(2,1))

  plot (range(temp_SCR04_val$dateheure), range(temp_SCR04_val[which (substr(colnames(temp_SCR04_val),1,1)=="T")], na.rm = T),
   type = "n", las = 1, bty = "n", xlab = "temps", ylab = "température",
main="Valeur des températures sur Ste Croix")

colonnesT = names(temp_SCR04_val)[which (substr(colnames(temp_SCR04_val),1,1)=="T")]
coul = rainbow(length(colonnesT))
names(coul) = colonnesT

for(i in colonnesT) {
  lines(temp_SCR04_val$dateheure, temp_SCR04_val[, i], col = coul[i])
  }

# ajout de la légende au graphique
lengthT<-length(which (substr(colnames(temp_SCR04),1,1)=="T"))
xleg <- rep(c(0),c(lengthT))
yleg <- c(1:lengthT)
plot (xleg, yleg, axes = F, type = "n", xlab = "", ylab = "")
legend('center', names(coul), pch = 19, col = coul, horiz = F, cex = 1, ncol =1)


  dev.off()
```

Le graphique obtenu avec ce script R est visible dans le § 2.4 (Figure 25).

Annexe 5. Proposition d'une fiche pour les campagnes de terrain dans le cadre du réseau thermique lacustre

Code du lac :

Nom du lac :

Intitulé de la campagne :

Intervenants :

Date de la campagne	Heure du début de la campagne (UTC)	Heure de fin de la campagne (UTC)

Heure d'été : UTC +2
Heure d'hiver : UTC +1

	Coordonnées X	Coordonnées Y	Heure de pose (UTC)	Heure de relève (UTC)	Intervalle d'enregistrement (min)	Date heure du départ d'enregistrement	Nb de sondes
Mouillage thermie							
Mouillage pression							

Si mouillage du capteur de pression, **cote (mNGF) du lac au départ des sondes** :

Remarque :

Annexe 6. Comparaison des tarifs entre plusieurs entreprises des divers éléments nécessaires à la fabrication des mouillages et des informations telles que la flottabilité maximale des bouées[1] (Flot. Max) ou la charge de rupture[2] (CR) (en bleu les éléments choisis pour les mouillages)

Matériel	Tecnorope		TA France		Rotax Marine		Prosensor	Signe
	Prix (€, HT)	Flot. max	Prix (€, HT)	Flot. max	Prix (€, HT)	Flot. max	Prix (€, HT)	Prix (€, HT)
bouée moussée					***47.05/pce***	***40kg***		
					55.52/pce	***64kg***		
					75.2/pce	129kg		
			51.22/pce	7kg				
flotteurs Nokalon	***25.66/pce***	***11kg***						
enregistreur de température							***160/pce***	
enregistreur de niveau d'eau							***570/pce***	
panneau informatif								***180/10***

1 Masse maximale que la bouée peut supporter avant de couler
2 Charge maximale de travail avant la rupture de l'élément donné

atériel	Dim.	Décathlon	Point P	Quincaillerie Aixoise		Fips		Acastillage Diffusion		Uship		Plastimo	
		Prix (€, HT)	Prix (€, HT)	Prix (€, HT)	CR	Prix (€, HT)	CR	Prix (€, HT)	CR	Prix (€, HT)	CR	Prix (€, HT)	CR
câble en inox gainé	Ø3 mm											***116.35***	***516kg***
	Ø4 mm			170.02/100m	916kg	1.08/ml	518kg	1.40/ml	660kg				
	Ø5 mm					2.01/ml	920kg	2.30/ml	970kg				
	Ø6 mm			320.02/100m	2070kg			3/ml	1450kg				
anneau brisé inox	Ø15 mm							4.10/10	NA	3/ml	NA		
	Ø20 mm												
	Ø22 mm					0.24/pce	NA					***7.15/50***	***NA***
	Ø25 mm												
cadenas étanche				***16.48/pce***	***NA***								
cadenas inox				67.9/pce	NA							22.36/pce	NA
chaine inox	Ø3 mm					22.25/5m	280kg	4.10/ml	300kg			208/50m	175kg
	Ø5 mm					56.25/5m	1000kg					***229.73/30m***	***487kg***

	Ø6 mm			559.59/100m	NA	87.15/5m	1250kg			14.9/ml	2200kg	391.80/30m	725kg
chambre à air		***3.20/2***											
collier en plastique				***10.14/100***	***NA***								
descendeur escalade		***5.95/pce***											
disque de fonte	1kg	***3.2/pce***											
	2kg	***4.4/pce***											
	5kg	***11/pce***											
	10kg	***22/pce***											
émerillon	Ø5 mm					2.6/pce	650kg						
	Ø6 mm					***3/pce***	***1200kg***						
	Ø8 mm											***10.01/2***	***1900kg***
étrier de selle inox	120 mm	***19.95/pce***											
manille droite	Ø6 mm					1.7/pce	1500kg	9.7/pce	2000kg	7.20/2	NA	55.60/10	1280kg
	Ø8 mm					2.5/pce	3000kg	8/pce	3600kg	5.4/pce		***58.89/10***	***2160kg***
mousqueton inox à œil	Ø6 mm					2.16/pce	NA	14.4/2	120kg	7.1/pce	750kg	79/10	120kg
	Ø8 mm					3.82/pce	NA	10/pce	800kg	9.8/pce	1000kg	***69.16/10***	***800kg***
serre câble à étriers inox	Ø3 mm					1.38/pce	NA	3.9/pce	NA	7.70/2	NA	***32.04/10***	***NA***
	Ø4 mm			***3.78/pce***	***NA***	1.46/pce	NA	3.9/pce	NA	8.50/2	NA		
	Ø5 mm			4.17/pce	NA	1.68/pce	NA	4.5/pce	NA	8.70/2	NA		
	Ø6 mm			4.42/pce	NA	1.94/pce	NA	4.5/pce	NA	8.9/pce	NA		
cordage	Ø8 mm					82.50/100m	1326kg	1.15/pce	1020kg	1.85/ml	1735kg	***137.28/220m***	***1400kg***
tige fer à béton	Ø8 mm		3/6m										
sac de béton prêt à l'emploi			***11.4/pce***										
tube pvc + bouchons				***0.30/pce***									

Annexe 7. Proposition technique et commerciale pour un système de mesure en profil dans les lacs par la société NKE Instrumentation

nke INSTRUMENTATION
Rue Gutenberg Z.I. Kerandré 56700 HENNEBONT-FRANCE
☎ : + 33 2 97 36 10 12 Fax : +33 2 97 36 55 17

IRSTEA
Centre de Aix en Provence
A l'attention de Mlle REBIERE
3275 Route de Cezanne
13182 AIX EN PROVENCE

Hennebont, le 13 mai 2013

PROPOSITION COMMERCIALE
Système de profilage

OFFRE N°: P13_160_0_IRSTEA

Bonjour,

Pour donner suite à votre demande vous trouverez ci après notre proposition pour un système de mesure en profil.

En vous souhaitant bonne réception, nous restons à votre disposition pour tous les renseignements que vous souhaiteriez.

Recevez nos meilleures salutations,

Goulven PRUD'HOMME
Responsable Commercial
ligne directe: 02 97 85 67 58

Descriptif

Le système permet la mesure en continue des paramètres pression, température et conductivité.

Le système est constitué de :
- 1 corps mort
- 2 lignes de guidage
- 1 profileur à ballast

Le corps mort est utilisé pour positionner le système au fond du lac et est constitué d'une platine en acier d'une trentaine de kilos. De cette platine, une barre horizontale de 5 mètres en fibre de verre est fixée afin de conserver une distance entre les 2 lignes de guidage.

Les lignes de guidage servent à maintenir le profileur en position pour obtenir des profils le plus vertical possible. Elles sont constituées d'un câble en acier gainé et de 2 flotteurs sub-surfaces positionnés à environ un mètre de profondeur. Ce dispositif permet d'avoir un système complètement invisible de la surface.

Le profileur à ballast est un profileur de type PROVOR équipé d'une tête de mesure pression, température et conductivité. Il est relié aux lignes de guidage par 2 laisses coulissantes lui limitant son rayon d'évitage. La longueur des laisses lui permet de sortir de l'eau pour la transmission des données.
Le profileur est complètement autonome. Le déplacement de montée descente est réalisé par un système de ballast hydraulique interne.
La mesure se fait en continue sans palier. Un script peut être programmé afin d'obtenir des mesures tous les 50cm jusque -20m puis tous les 4m jusqu'au fond par exemple.
Le nombre de profil et le nombre de transmission est paramétrable.
Pour une durée de vie de un an des batteries nous recommandons 2 profils par jour et une transmission (Iridium) tous les 4 jours.
Dans le cas où la transmission n'est pas utilisée (mode data logger), les données sont stockées en mémoire. Elles sont alors téléchargeables par lien Bluetooth après récupération du profileur. La capacité mémoire est de 800 profils.
Durant les périodes de glace, le profileur ne pouvant pas immerger, les données sont stockées en mémoire. Afin de protéger les capteurs et l'antenne de transmission de la collision avec la glace, une protection tubulaire en fibre de verre est installée en partie supérieure du profileur.
L'énergie électrique est fournie par un pack de batterie lithium. Le remplacement du pack batterie est réalisable par démontage du profileur.

Caractéristiques du profileur

Salinité
- gamme : de 0 à 40 PSU
- résolution : 0,001 PSU
- précision :±0,003 PSU
- dérive : <0,01 PSU / 5ans

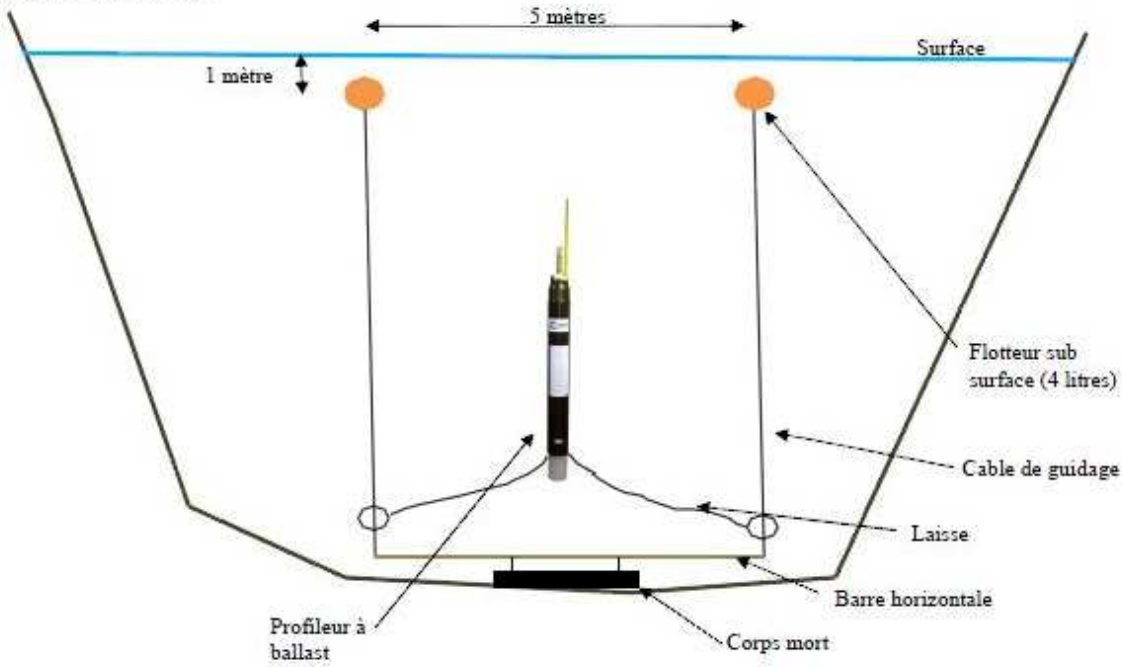
Température
- gamme : de -5°C à 35 °C
- résolution : 0,001 °C
- précision :±0,002 °C
- dérive : <0,002°C / 5ans

Pression
- gamme : de 0 dBar à 2100 dBars
- résolution : 1 dBar
- précision :± 2,4 dBar
- dérive : <5 dBar / 5ans

Dimensions

hauteur hors tout : 225 cm avec l'antenne
diamètre : 17,3 cm
poids : 34 Kg

Schéma de principe



Antenne Iridium et capteurs de mesure

Profileur avec protection anti collision

nke INSTRUMENTATION

Tableau des couts HT en €

Système de guidage et de mouillage	3 500 €
Profileur PROVOR	16 000 €
Adaptation logiciel pour utilisation lac	3 000 €
Etude mécanique	3 000 €
Ingénierie suivi de projet	4 500 €
Installation sur site Pavé ou Pavin (Sans transport du matériel, hors moyen nautique)	4 000 €
TOTAL	*34 000€*

Délai

A convenir

Conditions de paiement

Règlement à 45 jours date de facture.

Garantie

Les pièces remplacées dans le cadre de cette offre sont garanties un an pièces et main d'œuvre à partir de la date de départ de nke, retour usine.

Validité de l'offre

Notre offre est valable 3 mois.

Annexe 8. Template *Excel* pour calculer la masse (MT) et le volume(Vol) des éléments du mouillage thermie : cas du lac du Salagou (en italique, les éléments du corps mort non pris en compte dans le calcul car ils reposent sur le fond, les informations permettent de calculer les quantités)

Informations	Salagou
Lac sentinelle (0 ou 1)	0
vent (0 ou 1)	1
vandalisme (0 ou 1)	1
Pmax (m)	51.5
Phypo (m)	23.19
Mmax (m)	4.0

	Matériel	Unité	Poids g	Obtention	Volume cm3	Obtention	Nb / Longueur m	MT g	Vol cm3
Bouée	bouée Rotax 40L	pce	3150	constructeur	43400	constructeur	1.00	3150	43400
	bouée Rotax 64L	pce	4100	constructeur	69000	constructeur	0.00	0	0
	flotteurs Nokalon 11L	pce	3460	constructeur	11000	constructeur	0.00	0	0
	panneau informatif	ml	34.07	pesé			1	34.07	0
	étrier de selle inox	pce	537.73	pesé	102	mesuré	1.00	537.73	102
	descendeur escalade	pce	136.06	pesé	34	mesuré	1	136.06	34
	câble en inox gainé Ø3 mm	ml	46.5	pesé	15.0	mesuré	1.53	70.91	22.875
	serre câble à étriers inox	pce	15.295	pesé	2	mesuré	4	61.18	8
Câble A	câble en inox gainé Ø3 mm	ml	46.5	pesé	15.0	mesuré	48	2232	720
	serre câble à étriers inox	pce	15.29	pesé	2	mesuré	6	91.77	12
	émerillon Ø8 mm	pce	131	pesé	15.0	mesuré	1	131	15
	chaine inox Ø5mm	ml	391.73	pesé	48.7	m/ρ inox	8	3133.84	389.6
	manille Ø8mm	ml	59	pesé	10.0	mesuré	*1*	59	10
Câble B	enregistreur température équipé (attache+plaque)	pce	73.3	pesé	60	mesuré	*29*	2125.7	1740
	enregistreur de température nu	pce	42	pesé	48	mesuré	*0*	0	0
	anneau brisé inox Ø22mm	pce	1.98	pesé	0.3	mesuré	29	57.565	8.7
	chambre à air	h=7cm	6.98	pesé	6.0	mesuré	2.03	14.16	12.18
	collier en plastique	pce	4.48	pesé	8.0	mesuré	29	130.04	232
	mousqueton inox à œil Ø8mm	pce	28.6	pesé	6.0	mesuré	1	28.6	6
	cadenas étanche	pce	180	pesé	40.0	mesuré	1	180	40
	serre câble à étriers inox	pce	15.29	pesé	2	mesuré	41	627.09	82
	câble en inox gainé Ø3 mm	ml	46.5	pesé	15.0	mesuré	48	2232	720
	lest (1kg)	pce	1000	constructeur	150.0	mesuré	0	0	0
	lest (2kg)	pce	2000	constructeur	330.0	mesuré	1	2000	330
Corps mort	*disque de fonte 15 kg*		*15000*				*1*	*15000*	*0*
	disque de fonte 10 kg		*10000*				*0*	*0*	*0*
	chaine inox Ø5mm	*ml*	*391.73*	*pesé*	*48.7*	*m/ρ inox*	*0*	*0*	*0*
	manille Ø8mm	*ml*	*59*	*pesé*	*10.0*	*mesuré*	*1*	*59*	*10*

Masse (kg) /Volume (L) avec bouée	17.03	47.88
Masse (kg) /Volume (L) sans bouée	13.88	4.48
Masse (kg)/Volume bouée (L)	3.15	43.4
Résultante (kg)	**9.40**	
coefficient de sécurité30%	12.22	

Annexe 9. Quantité des éléments nécessaires à la réalisation des mouillages sur les sites pilotes

	Matériel	Salagou	Pavé	Malrif	Lauzanier	Aulnes	Pierre-Châtel	Pavin	Sainte Croix	Bimont	Total
Bouée	bouée Rotax 40L	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	4.00
	bouée Rotax 64L	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	2.00
	flotteurs Nokalon 11L	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.00
	panneau informatif	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	9.00
	étrier de selle inox	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	9.00
	descendeur escalade	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	9.00
	câble en inox gainé Ø3 mm (m)	1.53	0.95	0.95	0.95	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53	12.00
	serre câble à étriers inox	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	36.00
Câble A	câble en inox gainé Ø3 mm (m)	48.00	50.56	30.56	7.06	6.00	12.10	92.00	61.00	32.50	339.78
	serre câble à étriers inox	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	54.00
	émerillon	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	9.00
	chaine inox Ø5mm (m)	8.00	0.00	0.00	0.00	2.00	2.00	2.00	20.00	25.00	59.00
	manille Ø8mm	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	6.00
Câble B	enregistreur température équipé	29.00	0.00	0.00	0.00	5.00	6.00	39.00	27.00	27.00	133.00
	enregistreur de température nu	0.00	24.00	19.00	7.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	50.00
	anneau brisé inox Ø22mm	29.00	48.00	38.00	14.00	5.00	6.00	39.00	27.00	27.00	233.00
	chambre à air (m)	2.03	1.68	1.33	0.49	0.35	0.42	2.73	1.89	1.89	12.81
	collier en plastique	29.00	24.00	19.00	7.00	5.00	6.00	39.00	27.00	27.00	183.00
	mousqueton inox à œil Ø8mm	1.00	2.00	2.00	2.00	1.00	2.00	1.00	1.00	2.00	14.00
	cadenas étanche	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	4.00
	serre câble à étriers inox	41.00	36.00	31.00	19.00	17.00	18.00	51.00	39.00	39.00	291.00
	câble en inox gainé Ø3 mm (m)	48.00	47.56	27.56	7.06	6.00	10.00	97.00	61.00	31.00	335.18
	lest (1kg)	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.00
	lest (2kg)	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	6.00
Corps mort	disque de fonte 15 kg	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	6.00
	disque de fonte 10 kg	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.00
	chaine inox Ø5mm (m)	0.00	0.50	0.50	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.50
	manille Ø8mm	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	9.00

Annexe 10. Note informative envoyée lors des demandes d'autorisations auprès des gestionnaires et/ ou des propriétaires (le schéma du mouillage a été mis à jour depuis la rédaction de cette note cf. 1ère partie)

Mise en place d'un réseau national de suivi thermique des écosystèmes lacustres

Le changement climatique est à l'origine d'importantes modifications des écosystèmes à l'échelle mondiale, notamment sur la température des systèmes lacustres. En effet, la température est un élément essentiel du mélange des plans d'eau qui conditionne leurs fonctionnements chimique et biologique. Cependant, l'impact de ces modifications est peu connu.

L'ONEMA, organisme public, porte ainsi une attention particulière à l'impact de l'augmentation de la température des systèmes aquatiques. Il est l'instigateur de la mise en place d'une surveillance à long terme et en continue de la température des plans d'eau. La création de ce réseau est menée en partenariat avec l'Irstea au sein du Pôle « Hydro-écologie des Plans d'Eau » d'Aix-en-Provence, afin de mutualiser les compétences des deux établissements. Le réseau apportera un outil de mesure tant au service des gestionnaires que des scientifiques.

Objectifs du réseau :

- Affiner la connaissance du fonctionnement thermodynamique des plans d'eau en fonction des contextes locaux ;

- Construire des scénarios sur les évolutions futures et faire des projections sur les conséquences écologiques de ces évolutions ;

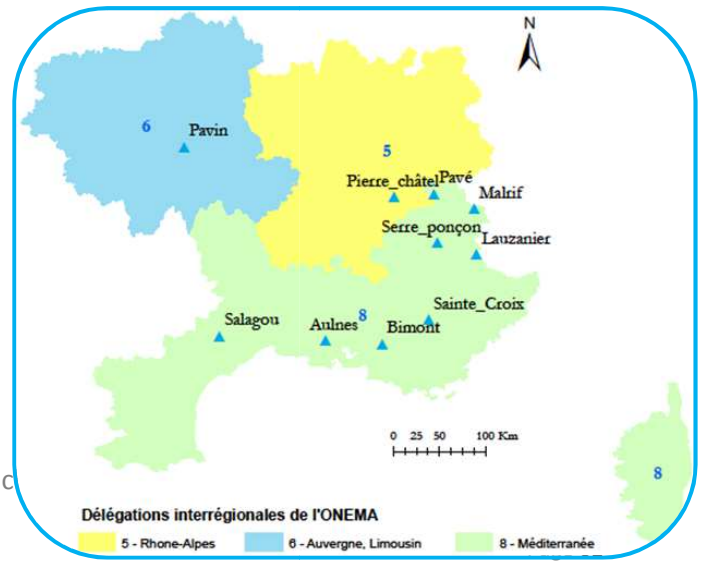
- Construire des indicateurs biologiques intégrant les conditions thermiques des plans d'eau et leur potentiellement changement de fonctionnement;

- Appuyer les stratégies d'adaptation des modes de gestion pour limiter les effets négatifs du changement climatique ;

- Assister la mise en place d'actions de restauration intégrées nécessaires à une gestion durable et analyser l'efficacité de ces mesures.

Sélection des sites pilotes :

Avant la mise en place du réseau de manière pérenne, il est nécessaire de tester les prototypes élaborés pour suivre la température des plans d'eau sur une sélection de sites pilotes, présentant une diversité de conditions climatiques, morphologiques et hydrologiques, et soumis à diverses contraintes techniques (marnage, gel, vent, forte fréquentation



touristique et de loisir). Dix plans d'eau ont été sélectionnés en fonction de leur proximité avec les délégations interrégionales de l'ONEMA impliquées dans ce test (Rhône-Alpes, Auvergne-Limousin et Méditerranée) et le Pôle d'étude et de recherche ONEMA-Irstea « Hydro-écologie des Plans d'Eau ». Cette phase de test débutera au cours de l'année 2013 dans le but d'éprouver la robustesse des solutions techniques de mesures et les contraintes logistiques de la mise en route du réseau. Après avoir dressé un bilan des solutions optimales à l'issue de cette étape, le réseau de suivi thermique sera initié à l'échelle nationale.

Protocole de mesures :

- Mesures en continue de la température de la colonne d'eau : de 0.5m sous la surface puis tous les mètres jusqu'à l'hypolimnion puis tous les 4 m jusqu'au fond du lac ;

- Mesures tous les ¼ d'heure pendant la phase de test, excepté pour les lacs d'altitude avec des mesures toutes les heures (conditions météorologiques défavorables à une visite de terrain) ;

- Mouillage des capteurs dans la zone la plus profonde et la plus éloignée des berges ;

- Installation des sondes de températures sur les principaux tributaires du lac suivi ;

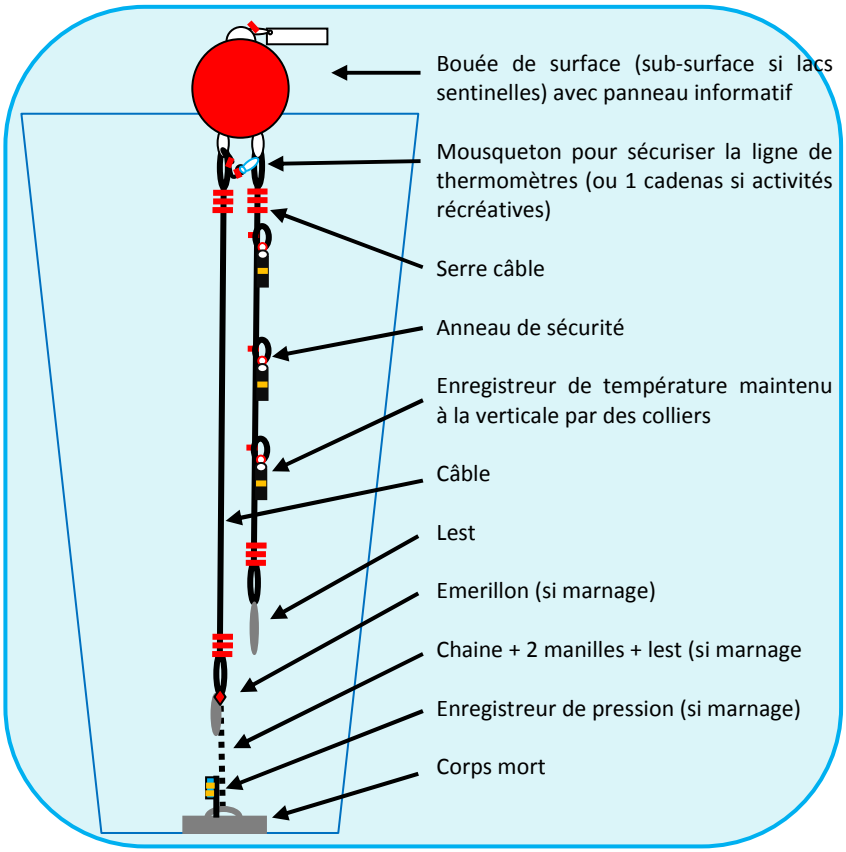
- Utilisation de capteurs de pression pour les lacs soumis à marnage pour estimer les variations de hauteur d'eau.

Les données de températures (et de pressions) sont stockées dans les sondes qu'il est nécessaire de décharger régulièrement à l'aide d'une base optique sur le terrain. Pour cela, il faut décrocher la ligne de sondes de la bouée et brancher la base optique sur chaque sonde.

Système de mouillage :

Les mouillages choisis pour immerger les sondes de températures sont construits à partir d'un système avec contrepoids afin de ne pas sortir le corps mort pour récupérer les données.

Une bouée de surface, ou de sub-surface dans le cas des lacs sentinelles d'altitude de l'arc alpin, est reliée au corps mort à l'aide d'un câble de même longueur que la profondeur du lac et fixé par des serres câbles. Pour les lacs soumis à marnage, une chaine est ajoutée à l'extrémité du câble dont la longueur est égale au marnage maximum généralement observé. Un capteur de pression est alors également disposé sur le corps mort. Un second câble, attaché



sous la bouée et lesté, sert de support aux enregistreurs de température placés aux profondeurs choisies. Des boucles sont formées le long du câble afin de fixer les thermomètres avec des anneaux de sécurité.

De plus, sur chaque site suivi un panneau informatif sera installé sur la bouée et/ou à proximité du lac.

Restitution des résultats de l'étude auprès des gestionnaires et des propriétaires :

A l'issue de ce test un rapport technique sera rédigé par le Pôle **d'étude et de recherche ONEMA-Irstea** « Hydro-écologie des Plans d'Eau ». Ce rapport sera mis à la disposition des gestionnaires et des propriétaires des sites pilotes qui auront permis ce test. Les données thermiques collectées pourront également être mises à leur disposition. Une présentation orale des principaux résultats sera également réalisée avec l'appui des délégations interrégionales concernées de l'ONEMA.

Contacts pour de plus amples informations :

- **Pôle d'étude et de recherche ONEMA-Irstea « Hydro-écologie des Plans d'Eau »** :
Mme Delphine Rebière
Chargée de mission "conception d'un réseau national de suivi thermique des écosystèmes lacustres"
3275 Route de Cézanne
CS40061
13 182 Aix en Provence Cedex 5
04 42 66 99 28
delphine.rebiere@irstea.fr

- Délégation interrégionale ONEMA "Rhone-Alpes":
Nom
intitulé du poste
adresse
n° de tel
mail

- idem pour les autres Délégation interrégionale ONEMA "

Nous remercions très sincèrement tous les gestionnaires et les propriétaires de sites qui auront permis la mise en place de ce test, avant le déploiement national du réseau de suivi thermique des écosystèmes lacustres français.

Pour le pôle d'étude et de recherche ONEMA-Irstea « Hydro-écologie des plans d'eau »

Jean-Marc BAUDOIN
Directeur du Pôle "Hydroécologie des plans d'eau"

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

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