



HAL
open science

Réflexion sur la mise en place d'un réseau de mesure thermique en plans d'eau

C. Rondel, P.A. Danis, Martin Daufresne

► **To cite this version:**

C. Rondel, P.A. Danis, Martin Daufresne. Réflexion sur la mise en place d'un réseau de mesure thermique en plans d'eau. irstea. 2011, pp.45. hal-02597636

HAL Id: hal-02597636

<https://hal.inrae.fr/hal-02597636>

Submitted on 15 May 2020

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

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

Partenariat 2010 – Changements globaux et climatiques et hydrosystèmes - Action 9.



Réflexion sur la mise en place d'un réseau de mesure thermique en plans d'eau

Rapport d'étape

*Caroline RONDEL (CEMAGREF)
Martin DAUFRESNE (CEMAGREF)
Pierre-Alain DANIS (ONEMA)*

Janvier 2011

Contexte de programmation et de réalisation

Les objectifs de la directive cadre sur l'eau impliquent un retour au bon état dans les eaux de surface en 2015 alors que le changement climatique modifie les conditions environnementales comme la température qui est l'un des éléments les plus structurants du fonctionnement des écosystèmes lacustres. Or, les conséquences de modifications thermiques sur les biocénoses sont peu connues. L'étude du fonctionnement thermique des plans d'eau français fortement lié au fonctionnement biologique améliorerait la connaissance des milieux lacustres.

Les auteurs

Caroline Rondel

Fonction ou mission

caroline.rondel@cemagref.fr

*Cemagref - Pôle études et recherches ONEMA-Cemagref Hydro-écologie des Plans d'Eau
3275 route Cézanne (RD 17 au Tholonet)
CS 40061 13182 Aix-en-Provence Cedex 5*

Martin Daufresne

Chargé de recherche CEMAGREF

martin.daufresne@cemagref.fr

*Cemagref - Pôle études et recherches ONEMA-Cemagref Hydro-écologie des Plans d'Eau
3275 route Cézanne (RD 17 au Tholonet)
CS 40061 13182 Aix-en-Provence Cedex 5*

Pierre-Alain Danis

Ingénieur ONEMA en pôle

pierre-alain.danis@onema.fr

*Cemagref - Pôle études et recherches ONEMA-Cemagref Hydro-écologie des Plans d'Eau
3275 route Cézanne (RD 17 au Tholonet)
CS 40061 13182 Aix-en-Provence Cedex 5*

Les correspondants

Onema : **Yorick Reyjol**, DAST Vincennes, *yorick.reyjol@onema.fr*

Cemagref : **Didier Pont**, Antony, *didier.pont@cemagref.fr*
Martin Daufresne, Aix-en-Provence, *martin.daufresne@cemagref.fr*

Référence du document : Rondel, C., P-A., Danis & M., Daufresne (2011). Réflexion sur la mise en place d'un réseau de mesure thermique en plans d'eau. Rapport d'étape. Convention ONEMA-CEMAGREF.

Droits d'usage :	<i>Accès libre</i>
Couverture géographique :	<i>National</i>
Niveau géographique	
Niveau de lecture :	<i>Professionnels, Experts</i>
Nature de la ressource :	<i>Document PDF</i>

Réflexion sur la mise en place d'un réseau de mesure thermique en plans d'eau

Rapport final

Caroline Rondel, Martin Daufresne, Pierre-Alain Danis

Résumé.....	4
Abstracts	5
1. Présentation générale du projet.....	6
1.1. Finalités	6
1.2. Contexte	6
1.2.1. Situation du projet par rapport aux autres projets de l'ONEMA.....	6
1.2.2. Analyse de l'existant	7
1.2.3. Suites prévues	7
1.2.4. Parties concernées par le projet et ses résultats	8
1.3. Les objectifs du réseau thermique des plans d'eau.....	8
2. Proposition de cahier des charges	9
2.1. Acquisition des données.....	9
2.1.1. Protocole de mesure	9
2.1.2. Appareillage de mesure	9
2.1.3. Stockage et transfert des mesures	10
2.1.4. Contraintes environnementales	11
2.1.5. Contrainte pour la collecte des données du réseau	12
2.2. Critères de sélection des sites de mesures	13
3. Solutions envisageables.....	13
3.1. Description des appareillages de mesure.....	13
3.1.1. Solution « fait-main »	14
3.1.2. Bouée instrumentée	16
3.2. Evaluation des coûts d'investissement	18
3.2.1. Equipement Bouée de surface + Anti-marnage 1	19
3.2.2. Equipement Bouée de surface + Anti-marnage 2	19
3.2.3. Equipement Bouée de surface + lake ESP	20
4. Lancement d'un test des solutions en situation.....	20
4.1. Appareillage de mesure.....	20
4.2. Proposition de site pilotes.....	20
4.2.1. Sites soumis aux marnages	20
4.2.2. Sites soumis à la neige et aux gels.....	21
4.2.3. Sites soumis à des vents importants.....	21
ANNEXES	23
Annexe 1 : Protocoles méthodologiques.....	24
Annexe 2 : Aléas et contraintes	29
Annexe 3 : Lignes de mouillage	33
Annexe 4 : Evaluation des coûts de fonctionnement du réseau.....	37

Réflexion sur la mise en place d'un réseau de mesure thermique en plans d'eau
Caroline Rondel, Martin Daufresne, Pierre-Alain Danis

Résumé

RESUME

Ce document s'intéresse à la faisabilité d'un réseau de suivi thermique en plans d'eau par l'étude des objectifs de suivi et d'un cahier des charges. Il propose également de tester quelques solutions technologiques.

MOTS CLES (THEMATIQUE ET GEOGRAPHIQUE)

DCE, température, plan d'eau, surveillance en continue, France

Study on the establishment of a water temperature monitoring network in water body
Caroline Rondel, Martin Daufresne, Pierre-Alain Danis

Abstracts

ABSTRACT

In this paper, we describe the aims and specifications of the setting up of a water temperature monitoring network in French water bodies. We also propose a set of technological solutions to be tested.

Key words (thematic and geographical area)

DCE, temperature, water body, permanent monitoring, France

Réflexion sur la mise en place d'un réseau de mesure thermique en plans d'eau
Caroline Rondel, Martin Daufresne, Pierre-Alain Danis

1. Présentation générale du projet

1.1. Finalités

Le changement climatique est l'une des plus importantes modifications environnementales subies par les écosystèmes à l'échelle mondiale. Les pouvoirs publics s'interrogent sur les conséquences de ce changement pour la gestion des milieux aquatiques. Néanmoins, les connaissances sur le fonctionnement de ces milieux restent encore limitées.

La Directive Cadre Européenne (DCE) sur l'eau a pour objectif d'amener l'ensemble des eaux européennes au bon état écologique en 2015. Avec le changement climatique, les états de référence évalués et les indicateurs risquent d'être modifiés. La mise en place d'une surveillance à long terme des écosystèmes aquatiques est un moyen de suivre leurs évolutions et de pouvoir faire des projections sur ces évolutions.

Avec les rivières et les fleuves, les plans d'eau représentent moins de 0.01% du volume total d'eau douce sur terre (l'eau douce ne représentant que 2.6% de l'eau sur terre) mais constituent une ressource essentielle pour les activités humaines (approvisionnement en eau, régulation des débits, ressources halieutiques ou loisirs). Dans les lacs et les réservoirs, la température de l'eau est un élément primordial du fonctionnement chimique et biologique. Par exemple, la stratification thermique estivale résultant du réchauffement de l'eau en surface influe sur la concentration en oxygène dissous et fait obstacle à la circulation de certains organismes. Les plans d'eau sont également des systèmes particulièrement sensibles aux modifications environnementales et, de ce fait, des témoins privilégiés du changement climatique global.

L'étude du fonctionnement thermique sur une large gamme de plans d'eau subissant des échelles de pressions anthropiques différentes permettrait de distinguer les effets des pressions locales des impacts du changement climatique. La mise en place d'un réseau de mesure thermique en continu dans les plans d'eau en France permettrait aussi d'analyser la dérive des indicateurs biologiques et donc d'intégrer dans le contexte général du changement climatique la gestion des lacs et réservoirs.

1.2. Contexte

1.2.1. SITUATION DU PROJET PAR RAPPORT AUX AUTRES PROJETS DE L'ONEMA

L'ONEMA investit dans la recherche sur le fonctionnement des écosystèmes aquatiques. Parmi les six thèmes de recherche développés, deux sont directement liés au changement climatique (Gestion de la ressource en eau, Dynamique des biocénoses aquatiques) et un troisième est concerné indirectement (Socio-économie, gestion, évaluation).

Le réseau thermique des plans d'eau est un moyen pour l'ONEMA d'affiner les connaissances sur le fonctionnement des écosystèmes face au changement climatique. L'atteinte du bon état

Réseau de mesures thermiques en plans d'eau, C. Rondel, M. Daufresne, P.-A Danis

est un enjeu important. Les connaissances sur l'évolution des conditions thermiques dans les plans d'eau permettront de construire des outils d'évaluation biologique mieux adaptés et des actions de restauration intégrées nécessaires à une gestion à long terme des milieux aquatiques.

La mise en place du réseau thermique en plan d'eau poursuit le travail prospectif commencé par l'ONEMA en 2007 avec le réseau thermique des cours d'eau.

1.2.2. ANALYSE DE L'EXISTANT

Depuis plusieurs dizaines d'années, les gestionnaires et scientifiques de l'environnement organisent des programmes de collaboration pour suivre les écosystèmes aquatiques. Quels que soient les objectifs du programme, la température est souvent un des paramètres récoltés. Par exemple, le projet Silmas est un programme de coopération international financé par la communauté européenne qui permet, en France, de suivre les lacs d'Annecy, de Serre-Ponçon et du Bourget. L'un des objectifs est de modéliser les effets du changement climatique sur ces grands lacs.

En 2001, l'INRA a créé les Observatoires de Recherche en Environnement (ORE) pour faciliter le suivi de l'environnement sur le long terme et la diffusion des données. Plus récemment, sous l'impulsion du Grenelle de l'environnement, l'agence de programmation pour la recherche en environnement (AllEnvi) évalue et finance des Systèmes d'Observation et d'Expérimentation, sur le long terme, pour la Recherche en Environnement (dit SOERE). L'objectif de ces programmes est de faciliter la conservation, la gestion et le partage des données entre partenaires. Dans le domaine aquatique, le SOERE Péri-Alpin a été mis en place pour suivre le fonctionnement des lacs d'Annecy, Léman, Bourget et le lac Pavin.

À partir de 2007, avec la mise en place de la DCE sur l'eau en France, des profils de température sont réalisés dans les lacs compris dans le programme de surveillance français. Ces mesures sont effectuées en parallèle à d'autres prélèvements biologiques 4 fois par an. Certains des lacs suivis par la DCE peuvent ou ont pu bénéficier d'un suivi particulier dans le cadre des programmes cités plus haut.

1.2.3. SUITES PREVUES

Les solutions techniques envisagées seront testées par l'ONEMA sur une sélection de sites pilotes proposés par le CEMAGREF (voir § 4.2) à partir du printemps 2011.

Un retour d'expérience, effectué en collaboration entre le CEMAGREF et l'ONEMA, courant 2012 donnera lieu à un choix de solutions techniques adaptés à la mesure thermique dans un ensemble plus large de plans d'eau nationaux.

L'installation du réseau de mesure thermique aura lieu entre 2013 et 2014. La sélection des plans d'eau à suivre au niveau national, s'appuiera sur l'expérience acquise sur les sites-pilotes et les résultats des échanges entre scientifiques et gestionnaires.

Il est envisageable de lancer des partenariats avec d'autres acteurs institutionnels du secteur de l'eau pour faciliter la construction d'un réseau opérationnel et la diffusion des résultats.

Dans le cas d'un élargissement du réseau à d'autres paramètres que la température, les partenariats avec les laboratoires scientifiques et les entreprises du secteur privé permettrait, si besoin, de développer de nouveaux outils de mesure.

Réseau de mesures thermiques en plans d'eau, C. Rondel, M. Daufresne, P.-A Danis

Il existe, au niveau international, un groupement de chercheur, GLEON (Global Lake Ecological Observatory Network), qui s'est organisé afin de favoriser l'utilisation et la création d'un réseau d'observations à hautes fréquences de différents paramètres lacustres (physico-chimique, biologique et climatiques). GLEON est une source d'information intéressante pour faire évoluer l'acquisition automatique de données sur les paramètres lacustres.

1.2.4. PARTIES CONCERNEES PAR LE PROJET ET SES RESULTATS

L'ONEMA est l'organisme qui lance le projet. Au sein du pôle d'études et de recherches ONEMA-CEMAGREF « Hydro-écologie plans d'eau », l'acquisition de donnée à haute fréquence devrait permettre aux scientifiques d'affiner les connaissances du fonctionnement des lacs et de mieux connaître les limites des variables d'états utilisées dans des modélisations déterministes de ces systèmes. Ces modèles serviront ensuite aux acteurs de l'eau pour adapter les modes de gestion des milieux aquatiques en intégrant la composante changements climatiques.

1.3. Les objectifs du réseau thermique des plans d'eau

Le réseau que l'ONEMA souhaite développer doit être un outil de mesure aux services des gestionnaires et des scientifiques.

Le but principal du réseau est :

Observer et connaître l'évolution en continue du fonctionnement thermique des plans d'eau en France

Pour atteindre cet objectif, il est important de considérer la diversité des contextes locaux (humains et environnementaux) des plans d'eau. Les mesures mises à disposition devront avoir été validées par l'ONEMA.

À moyen terme, les données de ce réseau serviront à :

- Préciser les mécanismes de mélange et stratification thermique en relation avec les contextes locaux
- Affiner la pertinence des modèles de fonctionnement thermique des plans d'eau.
- Lier le fonctionnement thermique et biotique des plans d'eaux pour améliorer les indicateurs biologiques de ces milieux.

Il convient de souligner que ce document n'a pas vocation à répondre à l'ensemble des étapes du fonctionnement du réseau thermique. En particulier, les aspects liés à la gestion et à la validation des données de l'ensemble du réseau seront évoqués mais non pas été traités dans leur globalité.

Ce document exprime les besoins matériels et humains pour la récolte des données (acquisition des données température, extraction des données sur site, maintenance sur site).

Il ne cherche absolument pas à définir :

- la gestion des données de l'ensemble du réseau,
- l'ensemble des étapes de validation des données brutes,
- les traitements nécessaires pour l'utilisation et la valorisation des données.

2. Proposition de cahier des charges

2.1. Acquisition des données

2.1.1. PROTOCOLE DE MESURE

Le protocole de mesure proposé est le résultat d'une analyse résumée en annexe 1.

Les mesures sont effectués en continue toute l'année.

Échantillonnage de la colonne d'eau :

À partir de 0,25 mètre sous la surface du lac, mesure tous les mètres jusqu'à l'hypolimnion puis tous les 3 m jusqu'au fond du lac.

Fréquence des mesures de température :

Une mesure par quart d'heure

Position du mouillage des capteurs :

Installation d'un mouillage au droit du lieu le plus profond et/ou d'un mouillage le plus loin des berges.

Action supplémentaire :

Installation de capteurs thermiques sur les tributaires en suivant l'organisation et le protocole du réseau national de température des cours d'eau.

2.1.2. APPAREILLAGE DE MESURE

L'appareillage de mesure est le système qui permet d'effectuer les mesures selon le protocole choisi. Le système peut être composé de plusieurs éléments indépendants.

a. L'appareillage doit prendre des mesures de température

Les mesures de température s'effectuent *in-situ* en suspension dans l'eau à des profondeurs différentes correspondant au protocole établi (cf. paragraphe précédent). Au moment de la mesure, la profondeur réelle à laquelle se trouve le capteur doit être connue¹.

Les capteurs de température peuvent effectuer des mesures de 0° à 40°C et doivent avoir une exactitude² minimum de 0,5°C; une résolution¹ minimum de 0,05°C, une durée de vie minimum de 3 ans et être étanches jusqu'à 120 m.

¹ Deux possibilités permettent de connaître la profondeur exacte d'une mesure. Par construction, en utilisant, par exemple un panier instrumenté, qui descend aux profondeurs voulues. Par compensation, à l'aide d'un capteur de pression qui permet d'estimer à posteriori la profondeur de la mesure.

² Rappel des définitions du Vocabulaire international de métrologie (VIM).

Exactitude (accuracy en anglais): étroitesse de l'accord entre une valeur mesurée et une valeur vraie du mesurande

Résolution (resolution en anglais): plus petite variation de la grandeur mesurée qui produit une variation perceptible de l'indication correspondante

Fidélité de mesure (precision en anglais): étroitesse de l'accord entre les valeurs mesurées obtenues par des mesurages répétés du même objet ou d'objets similaires dans des conditions spécifiées

Réseau de mesures thermiques en plans d'eau, C. Rondel, M. Daufresne, P.-A Danis

Les autres éléments permettant le maintien à la verticale du système doivent résister aux chocs et aux biofouling pendant des temps de séjour long dans l'eau (3 ans minimum).

b. L'appareillage doit disposer d'un système d'alimentation énergétique

Une source d'énergie alimente l'appareillage in-situ.

L'alimentation doit être autonome et échangeable. L'apport énergétique doit être suffisant pour répondre aux besoins du système pendant au moins un an.

2.1.3. STOCKAGE ET TRANSFERT DES MESURES

a. Les mesures de température doivent être conservées

Les mesures de température sont enregistrées et stockées immédiatement après la mesure. Un enregistrement inclut obligatoirement une mesure du temps et de la température.

La capacité de stockage doit permettre au minimum 52 560 enregistrements par an (i.e. entre 1 mesure par 15 minutes pendant un an).

Le système de stockage doit être étanche et résister à l'eau.

Flexibilité :

Le stockage des mesures peut être effectué *in situ* ou hors site

b. Le système doit pouvoir transmettre les mesures enregistrées

Les mesures enregistrées sont exportables sur un support externe à l'appareillage *in situ* par un opérateur.

Le système connectant les deux supports de stockage doit être étanche et ergonomique (branchement intuitif et déchargement quasi-automatique). Le support externe mobile doit être léger (moins de 5kg) et d'encombrement minimal. Sa capacité de stockage doit permettre l'enregistrement d'au minimum 50 séries¹ de mesures.

Pour l'opérateur, la formation initiale à la transmission des données ne doit pas dépasser 30 minutes.

c. Les enregistrements doivent pouvoir être lus

L'ensemble des enregistrements de température peut être lu par un opérateur.

L'ergonomie de la lecture des données doit être suffisamment simple pour ne pas avoir à former les différents utilisateurs.

Flexibilité :

Une formation initiale de l'opérateur inférieure à 1 journée est acceptable.

La lecture immédiate des résultats n'est pas obligatoire.

¹ Série de mesure : on considère une série de mesure comme une chronique d'enregistrement de la température effectué sur un point de mesure de la colonne d'eau pendant un an

Réseau de mesures thermiques en plans d'eau, C. Rondel, M. Daufresne, P.-A Danis

d. Les données stockées doivent être interoperables

Les mesures enregistrées peuvent être lisibles par des logiciels de traitement de données courant (pack office Word ou Open Office).

Flexibilité :

Possibilité de passer par un logiciel de transformation des données au format souhaité.
Ce logiciel doit être fourni avec l'appareil de mesure et être ergonomique (*i.e.* formation initiale à l'outil de moins d'une journée)

2.1.4. CONTRAINTES ENVIRONNEMENTALES

Dans le cadre d'un réseau de mesure, l'importance des variations des aléas environnementaux d'un site à l'autre n'est pas négligeable. Il est préférable que l'ensemble du système, appareillage de mesure et stockage des enregistrements, prennent en compte l'ensemble de ces situations. Une analyse détaillée des risques associés aux aléas présentés ici est disponible en annexe 2.

a. La mesure ne doit pas être perturbée par les vents

L'ensemble du système doit assurer la verticalité des mesures par des vents de force inférieure à force 6¹ (échelle de beaufort).

L'ensemble du système ne doit pas être déplacé du point de mesure (*i.e.* droit du lieu de plus grande profondeur) par des vents de force 8¹.

Flexibilité :

L'oscillation autour du point de mesure doit être inférieure à 3 mètres.

b. La mesure en profil n'est pas perturbée par le marnage

L'ensemble du système doit assurer une mesure du profil vertical de la colonne d'eau quelles que soient les variations du niveau d'eau dans le plan d'eau.

Flexibilité :

Les profondeurs de mesure peuvent être extrapolées. En dessous d'une variation de niveau d'eau de 5 mètres, il n'y a pas besoin de système de compensation.

c. La mesure ne doit pas être perturbée par la neige ni le gel

L'ensemble du système doit assurer une mesure du profil vertical de la colonne d'eau pendant les périodes de gel et de dégel. La neige ne doit pas empêcher l'enregistrement et la prise de mesure.

L'ensemble du système ne doit pas être déplacé du point de mesure.

d. Le système doit être sécurisé

L'ensemble du système doit être équipé d'éléments avertissant sa présence. Les informations concernant les gestionnaires du réseau de mesure doivent être disponibles sur le système de mesure.

¹ Analyse documentations techniques et comm. pers. constructeurs

Réseau de mesures thermiques en plans d'eau, C. Rondel, M. Daufresne, P.-A Danis

L'ensemble du système doit être le plus discret possible afin d'éviter le vandalisme.

Flexibilité :

Le niveau de discrétion du système peut être revu à la baisse en fonction de l'efficacité de la solution proposée sur les autres points.

2.1.5. CONTRAINTE POUR LA COLLECTE DES DONNEES DU RESEAU

a. L'installation de l'ensemble du système *in situ* doit être simple

La technicité requise pour l'assemblage des éléments du système de mesure *in situ* doit être minimale :

- Opérateur : la formation initiale au montage de l'installation ne doit pas excéder une demi-journée
- Montage en moins d'une demi-journée par une équipe réduite (2 à 3 personnes maximum)

Flexibilité :

Pour la partie qui permet la suspension du système de mesure (*e.g.* ponton flottant), la charge et le personnel peuvent être supérieure à condition que celle-ci reste en place sur le lac plus de 10 ans

b. L'ensemble du système doit être transportable facilement

Les éléments du système de mesure ne doivent pas nécessiter l'utilisation de matériel de levage ou de véhicule lourd (transport par bateau et véhicule léger).

Les éléments doivent être manipulables par une équipe réduite (2 à 3 personnes maximum). Le poids total des éléments du système est inférieur à 300 kg.¹

Flexibilité :

Pour la partie qui permet la suspension du système de mesure (*e.g.* ponton flottant), la charge et le personnel peuvent être supérieure à condition que celle-ci reste en place sur le lac plus de 10 ans

c. La calibration des appareillages doit être effectuée régulièrement

La validité des mesures prise par le système de mesure peut être vérifiée à l'aide d'un système de référence externe.

Flexibilité :

La vérification hors site est possible si elle donne un avantage qualitatif à la donnée. *Par exemple, considérons que les visites sur site se font une fois par an et que la vérification des données ne peut pas se faire immédiatement. Après une première visite, un capteur identifié comme défectueux ne pourra être échangé que lors du prochain contrôle. On perd donc au moins un an de données. Si le capteur est échangé dès la première visite de contrôle et la vérification effectuée hors site, la perte de donnée sera inférieure à un an (temps entre 2 visites de contrôle).*

d. L'usure du matériel doit pouvoir être évaluée *in situ*

Pour chaque élément du système, les marques d'usure doivent être identifiées afin de permettre à l'opérateur de reconnaître un élément défectueux.

¹ Comm. pers. constructeurs

Réseau de mesures thermiques en plans d'eau, C. Rondel, M. Daufresne, P.-A Danis

Flexibilité :

À défaut, une durée de vie moyenne des différents éléments du système peut être évaluée et le remplacement des éléments effectués selon cette périodicité.
Le suivi individuel de chaque élément matériel appartenant au réseau est recommandé (permet de savoir quel éléments remplacer et à quel moment).

e. Les éléments du système doivent pouvoir être échangés

Chaque constituant du système peut être remplacé par un autre élément de fonction équivalente¹.

Les manipulations pour remplacer/échanger les appareils doivent pouvoir être effectuées *in situ*.

Flexibilité :

Les manipulations peuvent avoir lieu en berge mais elles ne doivent jamais nécessiter un retour à l'usine de l'ensemble du système.

2.2. Critères de sélection des sites de mesures

Les critères sont les suivants :

- Les lacs appartiennent à l'un des réseaux mis en place par la directive cadre. Avec par ordre de priorité : RCS², Référence², RCO², Enquête².
- Accessibilité des lacs: les sites doivent être facilement accessibles par la route au printemps.
- Sécurité et pérennité : des accords avec les gestionnaires du lac doivent garantir les installations pendant une longue durée et, notamment, l'acceptation par ses usagers.

Le maillage doit être :

- Représentatif de la diversité climatique (vent/gel) et des contrastes géographiques français.
- Représentatif de la diversité morphologique, hydrologique (variation de niveau) et géologique des lacs (fond).
- Cohérent et corrélable avec le réseau thermique de suivi des cours d'eau

3. Solutions envisageables

3.1. Description des appareillages de mesure

Deux familles de solutions peuvent être proposées et répondent à l'obligation principale (verticalité de la mesure). La première famille de solutions est une série de systèmes assemblés à la main par les opérateurs à partir de capteurs individuels et d'équipement pour

¹ Élément de fonction équivalente: compatibilité avec le reste du système

² RCS : Réseau de contrôle de surveillance

Référence : Réseau de référence

RCO : Réseau de contrôle opérationnel

Enquête : Réseau de contrôle d'enquête

Pour connaître les objectifs des différents réseaux voir l'article 8 de la directive cadre sur l'eau

Réseau de mesures thermiques en plans d'eau, C. Rondel, M. Daufresne, P.-A Danis

mouillage de bateau. La seconde famille de solution est une série de matériel proposée par les constructeurs. Ce matériel comprend une bouée spécifiquement adaptée à recevoir les informations transmises par les instruments qui lui sont rattachés, dans le cas qui nous intéresse, une chaîne de thermistances.

3.1.1. SOLUTION « FAIT-MAIN »

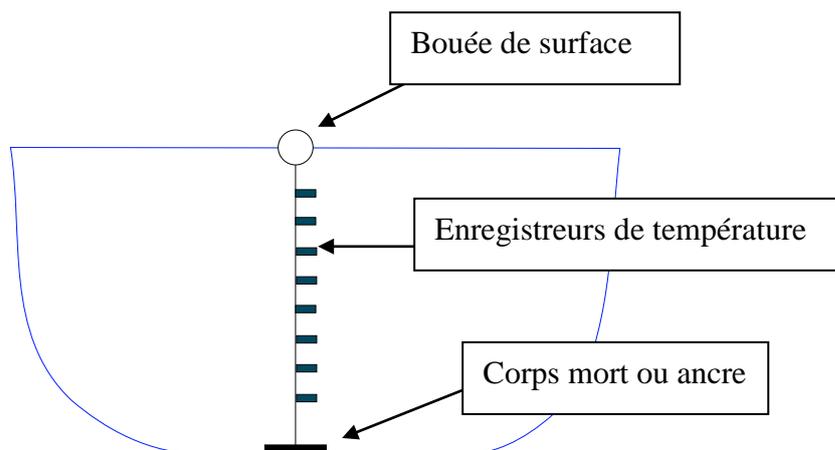
Un ensemble de solutions « fait-main » est proposé en annexe 3. Nous ne présentons ici que les trois solutions retenues.

Pour chacune des solutions présentées, la mesure est effectuée par des enregistreurs de température qui effectuent à la fois la mesure de la température et le stockage de l'information.

a. Mouillage en surface

Une bouée est placée à la surface de l'eau. Un câble de même longueur que la profondeur du lac est attaché sous la bouée et ancré au fond du plan d'eau. Ce câble sert également de support aux enregistreurs de température placés aux profondeurs choisies (figure ci-dessous).

Illustration de la solution mouillage en surface



Cette solution répond aux principales attentes exprimées avec quelques limites vis-à-vis des contraintes environnementales. Le choix d'une bouée de surface aérodynamique peut diminuer la contrainte liée au vent. La sélection d'un amarrage et de câble supportant des tensions importantes devrait permettre d'éviter la rupture des liens aux périodes de gel et dégel.

Une contrainte en particulier pose problème :

La variation du niveau d'eau. La ligne de capteur ne pouvant être tendue que lorsque le lac est à son plus haut niveau, il faut pouvoir estimer la profondeur exacte de la mesure. Dans le cas d'une variation de grande amplitude, l'évaluation de la profondeur par une mesure de pression est difficile (le comportement de la ligne de mesure est

Réseau de mesures thermiques en plans d'eau, C. Rondel, M. Daufresne, P.-A Danis

imprévisible, la ligne peut s'em mêler sur elle-même). Il apparaît plus sûr de se diriger vers une autre solution.

La récupération des données¹ lors de la phase d'exploitation du réseau semble être simple. Cet aspect devra néanmoins être vérifié lors de la phase pilote de mise en place du réseau.

b. Mouillage anti-marnage

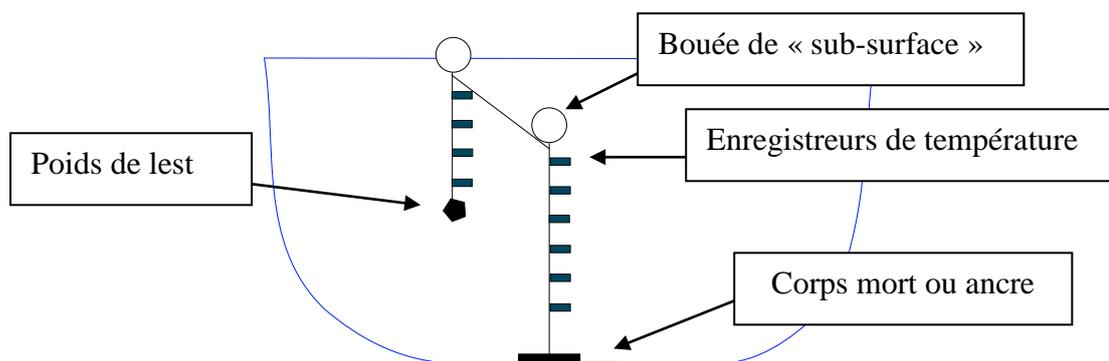
Deux montages ont été imaginés pour résoudre les problèmes liés au marnage. Comme la solution précédente, ils répondent aux attentes exprimées (dont la principale, la verticalité des mesures).

Le principe de fonctionnement est le même dans les deux cas. Les solutions sont constituées de deux composantes, une partie basse située sous la limite inférieure du marnage et une partie supérieure mobile. En fonction de la hauteur d'eau du lac, la seconde composante mesure la partie supérieure de la colonne d'eau ou se superpose à la mesure de la partie inférieure. La différence principale entre les montages se situe au niveau du lien entre les 2 composantes.

Solution anti-marnage 1 :

Une bouée, dites « bouée de sub-surface », est placée à la limite inférieure de la zone de marnage. Sous cette bouée se trouve un câble relié au fond du lac par un corps mort ou une ancre. La température de cette partie de la colonne d'eau est suivie en permanence verticalement par des enregistreurs attachés au câble. Une bouée en surface est directement attachée à la bouée de « sub-surface » par un câble. Sous cette bouée de surface est placé un câble lesté auquel des enregistreurs sont attachés (figure ci-dessous).

Illustration de la solution anti-marnage 1



Quelques inconvénients subsistent:

+ Les tensions sur les câbles seront probablement plus importantes dû à l'entraînement par la bouée de surface.

¹ Comm. pers. chercheurs et gestionnaires (Parcs, ONEMA)

Réseau de mesures thermiques en plans d'eau, C. Rondel, M. Daufresne, P.-A Danis

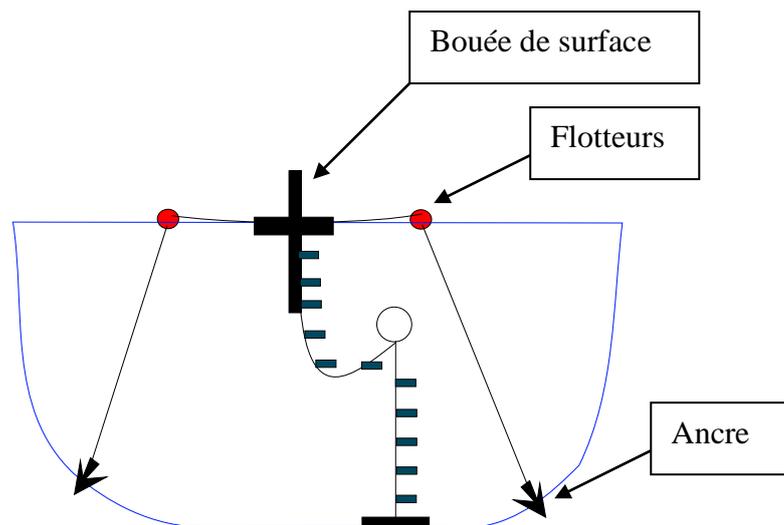
+ Le câble lesté peut facilement s'emmêler avec le câble situé sous la bouée de « sub-surface ».

A notre connaissance, ce type de montage n'a pas encore été expérimenté pour un réseau de mesure thermique. Les difficultés rencontrées par les opérateurs lors de l'étape de récupération des données sont mal connues pour cette solution. Cet aspect devra être testé de manière approfondie lors de la phase pilote.

Solution anti-marnage 2 :

La température est suivie par des enregistreurs attachés au câble. La bouée de surface est reliée à des petits flotteurs eux-mêmes ancrés en deux points différents du lac. Les enregistreurs sont placés sur le câble reliant la bouée en surface et la bouée de « sub-surface ». La bouée de « sub-surface » est installée, comme dans la solution précédente, sous la zone de marnage et ancrée au fond du lac (figure ci-dessous).

Illustration de la solution anti-marnage 2



Le double ancrage avec flotteurs réduit les oscillations autour du point de mesure et prévient tout enchevêtrement des câbles. Il permet également de réduire la tension entre les deux composantes du montage. Néanmoins, l'étape de déchargement des données risque d'être plus complexe.

Comme dans le cas précédent, il n'a pas été trouvé d'exemple de montage équivalent pour mesurer la température en plan d'eau. Il est donc important de pouvoir tester l'efficacité de ce type de montage pendant la phase de récupération des données lors de la phase pilote.

3.1.2. BOUEE INSTRUMENTEE

De nombreux constructeurs proposent des bouées et des chaînes de thermistances. Ce matériel est issu de l'expérience acquise sur les bouées océanographiques. Il existe différentes tailles

Réseau de mesures thermiques en plans d'eau, C. Rondel, M. Daufresne, P.-A. Danis

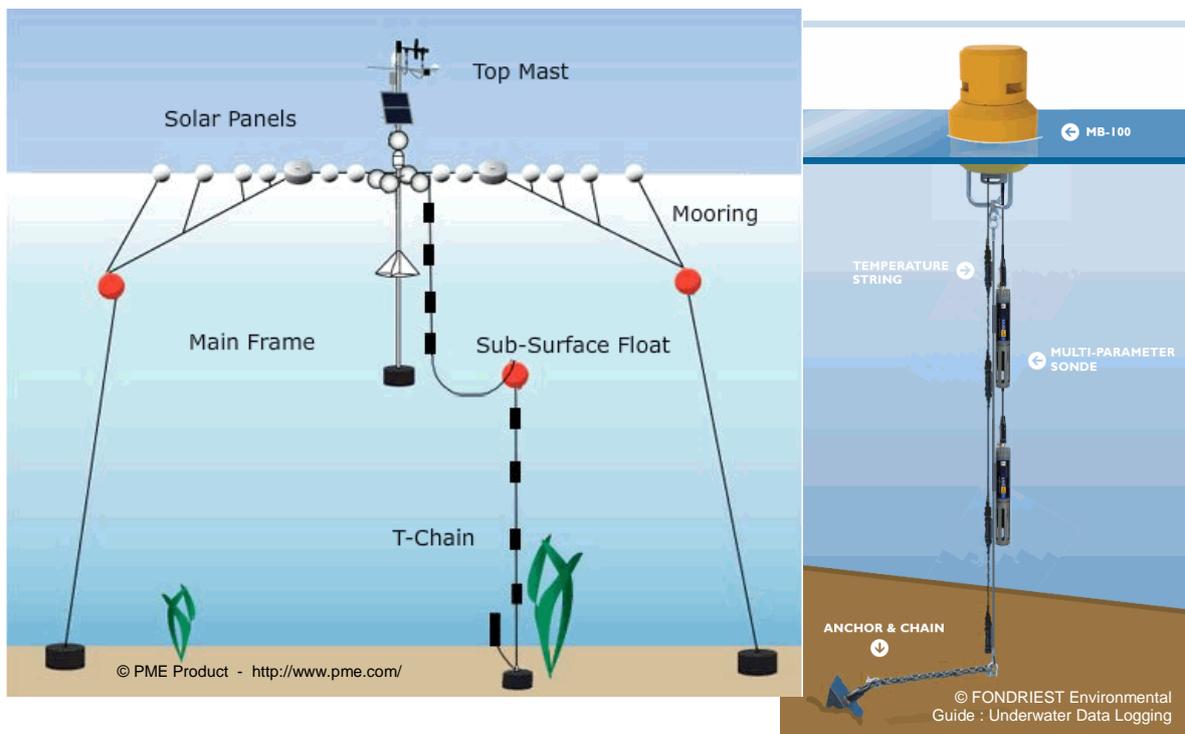
de flotteur. La plupart de ces flotteurs ont une flottabilité qui leur permet de rester à la surface (la bouée MB100 de NexSens est une des exceptions car elle peut être utilisée en surface comme en sub-surface, figure 1). Pour gérer le problème du marnage, le mouillage des bouées est effectué en plusieurs points (2 à 3 points) avec des flotteurs supplémentaires pour permettre une certaine mobilité (figure 1). Le système Lake ESP, par exemple, est spécialement conçu pour s'adapter au marnage et peut gérer jusqu'à 20 m de variation de niveau d'eau. Par contre, ce système semble très fragile face aux vents ou au gel.

Les chaînes de thermistances sont composées de capteurs montés en série. Les capteurs peuvent être montés d'un seul bloc avec le câble qui alimente et transmet les données. Il existe également des chaînes en kit où les capteurs sont vissés entre eux par des câbles (chaîne de thermistances T-Node de NexSens, figure 2). Cette dernière solution à l'avantage d'être plus maniable pour l'échange du matériel. Le système d'acquisition des données et d'alimentation électrique se trouve à l'intérieur de la structure flottante en surface dans un compartiment étanche.

L'inconvénient majeur de ce type de matériel est son coût. Le prix de la structure seule est quatre fois plus élevé que celui d'un mouillage classique. Les coûts des chaînes de thermistances elle-même sont à peu près équivalents aux coûts des systèmes « fait-main ».

L'avantage majeur de ce type de matériel est l'obtention des mesures en temps réel grâce à la télétransmission. Cela permet de mettre en évidence rapidement un dysfonctionnement et d'envoyer une équipe de maintenance sur place pour le régler. De plus, ces appareils pouvant accueillir de nombreux capteurs, le suivi de nouveaux paramètres autres que la température est facilité.

Figure 1 : Deux exemples de système de bouée instrumentée. Le système lake ESP (Environmental Sensing Platform) de PME à gauche. La bouée instrumentée MB-100 de Nex Sens et deux sondes multi-paramètres YSI 6920 V2-2 à droite.



Réseau de mesures thermiques en plans d'eau, C. Rondel, M. Daufresne, P.-A Danis

Note : La volonté exprimée de prendre des mesures de température dans l'épilimnion (cf. protocole §2.1.1. et annexe 1) oblige à poser une bouée à la surface de l'eau. Il semble que la présence d'une bouée visible¹ à la surface cause des désagréments visuels non négligeables pour le tourisme dans les parcs et les lacs de montagnes. Bien que ceci ne soit pas identifié dans le cahier de charges fonctionnelles, il faudra en tenir compte dans la sélection finale des solutions. Cet aspect peut entrer en conflit avec la sécurisation de l'appareillage et des personnes inscrite dans le cahier des charges.

Figure 2 : Chaîne de thermistances T-Node de NexSens.



3.2. Evaluation des coûts d'investissement

Les hypothèses considérées pour la mise en place du réseau sont totalement arbitraires et devront être réévaluées et discutées avec l'ONEMA après la phase de test. Les détails de l'estimation des coûts sont en annexe 4.

Les hypothèses principales sont les suivantes :

+ 20 lacs qui seront équipés en fonction de leur profondeur maximale. Ce nombre est arbitraire mais à été choisi car (i) il permet de considérer une variabilité raisonnable de situations et (ii) il est vraisemblablement du même ordre de grandeur que le nombre de lacs qui seront effectivement équipés et peut donc fournir une base de calcul simple pour évaluer le coût total de l'opération (pour 20, 40, 60, 80 ... lacs équipés).

+ Un quart des lacs marne et tous les lacs qui marnent ont une profondeur maximale supérieure à 7 mètres.

Les coûts calculés² sont des estimations grossières. Ils ne prennent pas en compte l'utilisation de matériels spécifiques répondant à toutes les conditions environnementales (*e.g.* ancres non spécifiques à un type de fond, bouées non aérodynamiques, câbles en cordage polyamide simple). L'évaluation des besoins logistiques n'est qu'une première approximation, elle nécessitera une rediscussions approfondie avec les personnels de terrain de l'ONEMA et les constructeurs de bouées instrumentées. Une sous-estimation de la technicité nécessaire aux étapes d'installation et de récupération des données pourrait considérablement allonger la durée du travail sur site. Par ailleurs, la durée de chaque phase ne considère que le temps passé sur le site mais ne comptabilise pas le temps de transport sur site. Le manque d'information sur ces étapes de fonctionnement du réseau montre l'importance d'une phase de test et d'un accompagnement technique efficace lors de cette phase.

¹ Ingénieurs en délégation à l'ONEMA, Comm. Pers.

² Les hypothèses de calcul et l'estimation des coûts sont détaillées en annexe 4.

Réseau de mesures thermiques en plans d'eau, C. Rondel, M. Daufresne, P.-A Danis

Trois solutions d'équipement pour le réseau sont possibles :

1. Bouée de surface + Anti-marnage 1 : Les lacs qui ne marnent pas sont équipés de solution « fait-main » avec mouillage de surface et les lacs dont le niveau varie beaucoup sont équipés d'une solution « fait-main » avec mouillage anti-marnage de type 1.
2. Bouée de surface + Anti-marnage 2 : Les lacs qui ne marnent pas sont équipés de solution « fait-main » avec mouillage de surface et les lacs dont le niveau varie beaucoup sont équipés d'une solution « fait-main » avec mouillage anti-marnage de type 2.
3. Bouée de surface + lake ESP : Les lacs qui ne marnent pas sont équipés de solution « fait-main » avec mouillage de surface et les lacs dont le niveau varie beaucoup sont équipés d'une bouée instrumentée (ici le système lake ESP de PME, figure 1).

Les investissements comprennent :

- L'achat du matériel,
- La constitution d'un stock de pièce de rechange,
- L'exploitation du réseau sur le terrain

Ne sont pas compris : le coût éventuel des logiciels permettant la transformation de la donnée stockée en donnée exploitable, celui de l'abonnement GSM pour la transmission des données, ni celui du matériel informatique nécessaire à ces opérations.

3.2.1. EQUIPEMENT BOUEE DE SURFACE + ANTI-MARNAGE 1

Achat du matériel	56,0 k€H.T.
Stock pièce de rechange	11,2 k€H.T.
Dépenses spécifiques lancement réseau.....	1,0 k€H.T.
Exploitation annuelle.....	10,0 k€H.T.

Total d'investissement pour la première année78.2 k€H.T.

3.2.2. EQUIPEMENT BOUEE DE SURFACE + ANTI-MARNAGE 2

Achat du matériel	56,8 k€H.T.
Stock pièce de rechange	11,4 k€H.T.
Dépenses spécifiques lancement réseau.....	1,0 k€H.T.
Exploitation annuelle.....	10,0 k€H.T.

Total d'investissement pour la première année79.2 k€H.T.

Réseau de mesures thermiques en plans d'eau, C. Rondel, M. Daufresne, P.-A. Danis

3.2.3. EQUIPEMENT BOUEE DE SURFACE + LAKE ESP

Achat du matériel	154,5 k€H.T.
Stock pièce de rechange	30,9 k€H.T.
Dépenses spécifiques lancement réseau.....	2,2 k€H.T.
Exploitation annuelle.....	10,0 k€H.T.

Total d'investissement pour la première année197.6 k€H.T.

Rappel : Les coûts de l'abonnement GSM pour la télétransmission ne sont pas pris en compte.

4. Lancement d'un test des solutions en situation

4.1. Appareillage de mesure

Il semble essentiel de tester les montages « fait-main » pour évaluer leur résistance et leur simplicité d'utilisation. Nous nous proposons de les tester sur les sites pilotes présentés au paragraphe suivant.

Les coûts des solutions constructeurs sont importants. Si, pour des raisons financières, il n'est pas possible de tester cette solution, il semble important de maintenir une veille technologique active sur les bouées instrumentées lors de la phase de test.

Les conditions extrêmes impliquent l'utilisation de matériel spécifique (bouées aérodynamique, mouillages avec flotteurs accompagnant le marnage...). Les connaissances du CEMAGREF étant limitées dans ce domaine, il serait judicieux, lors de cette phase de test, de s'adjoindre les services d'une société spécialisée dans le gréement et la confection de mouillage.

4.2. Proposition de site pilotes

L'objectif des sites pilotes est de tester les solutions « fait-main » proposées en conditions réelles extrêmes. Les sites sélectionnés sont soumis à au moins une des contraintes environnementales mises en évidence dans le cahier des charges fonctionnel. Leur représentativité au niveau nationale n'est pas, dans ce cadre, un enjeu. Ce test permet également d'éprouver les aspects logistiques de la mise en route du réseau.

Nous avons choisi une quinzaine de sites sur lesquels des essais pourraient être effectués (tableau 3). Nous proposons de sélectionner au moins un site pilote par type de contrainte.

Les plans d'eau sont regroupés par contraintes. Pour chaque groupe, les plans d'eau sont inscrits selon l'ordre de priorité que nous conseillons.

4.2.1. SITES SOUMIS AUX MARNAGES

- 1- Lac des Treignac :** En plus d'appartenir au réseau DCE, ce lac fait l'objet d'un suivi piscicole et hydro-biologique par le CEMAGREF qui durera au moins 2 ans.

Réseau de mesures thermiques en plans d'eau, C. Rondel, M. Daufresne, P.-A Danis

- 2- Lac du Bimont :** Bien que peu suivi dans le cadre des réseaux DCE, sa proximité avec le pôle plan d'eau ONEMA-CEMAGREF lui donne un avantage non négligeable.
- 3- Lac de Lanous Anousse (Estany de Lanos) :** Plan d'eau sur le territoire de la délégation interrégionale Méditerranée.
- 4- Retenue de Quinson :** Plan d'eau sur le territoire de la délégation interrégionale Méditerranée.
- 5- Lac de la Raviège :** Plan d'eau sur le territoire de la délégation interrégionale Méditerranée.
- 6- Retenue de Naussac :** Plan d'eau sur le territoire de la délégation interrégionale Méditerranée.

4.2.2. SITES SOUMIS A LA NEIGE ET AUX GELS

- 1- Lac des Treignac :** En plus d'appartenir au réseau DCE, ce lac fait l'objet d'un suivi piscicole et hydro-biologique par le CEMAGREF qui durera au moins 2 ans.
- 2- Lac d'Allos :** Plan d'eau à proximité du pôle plan d'eau ONEMA-CEMAGREF et de la délégation interrégionale Méditerranée.
- 3- Lac de Pradeille :** Plan d'eau sur le territoire de la délégation interrégionale Méditerranée.
- 4- Retenue de Chaudanne :** Plan d'eau sur le territoire de la délégation interrégionale Méditerranée.

4.2.3. SITES SOUMIS A DES VENTS IMPORTANTS

- 1- Etang des Aulnes :** Plan d'eau à proximité du pôle plan d'eau ONEMA-CEMAGREF et de la délégation interrégionale Méditerranée.
- 2- Lac Entressen :** Plan d'eau à proximité du pôle plan d'eau ONEMA-CEMAGREF et de la délégation interrégionale Méditerranée
- 3- Bassin du Réaltor :** Plan d'eau à proximité du pôle plan d'eau ONEMA-CEMAGREF et de la délégation interrégionale Méditerranée
- 4- Estrade:** Lac sur le territoire de la délégation interrégionale Méditerranée.
- 5- Etang de Jouarres Laprade :** Lac sur le territoire de la délégation interrégionale Méditerranée.

Réseau de mesures thermiques en plans d'eau, C. Rondel, M. Daufresne, P.-A Danis

Tableau 3 : Caractéristiques morphologique et typologique des lacs proposés comme sites pilotes

Plan d'eau	Superficie (km ²)	Profondeur maximum (m)	Profondeur moyenne (m)	Marnage (m)	Altitude (m)	Typologie Plan d'eau	DCE	Département	Aléas principaux
Pradeille (PRA66)	0.1	16	5	NA	1950	Lac naturel	Référence, Enquête	Pyrénées Orientales (66)	Gel
Allos (ALL04)	0.5	51	18.5	9	2232	Lac naturel	RCS, Référence, Enquête	Alpes de Haute Provence (04)	Marnage, Gel
Bassin du Réaltor (REA13)	0.6	10	1.6	-	159	Réservoir	RCO, Enquête	Bouche du Rhône (13)	Vents
Chaudanne (CHO04)	0.7	69	23.5	4	792	Réservoir	RCO	Alpes de Haute Provence (04)	Vents, Gel
Bimont (BIM13)	0.7	55	21.9	NA	330	Réservoir	Enquête	Bouche du Rhône (13)	Marnage
Treignac (TRE19)	0.8	22	8.7	12	513	Réservoir	RCS, Enquête	Corrèze (19)	Marnage, Gel
Etang de Jouarres Laprade (JOU11)	0.9	4	2.6	-	50	Artificiel	RCS, RCO, Enquête	Aude (11)	Vents
Etang des Aulnes (AUL13)	0.9	5.5	3.8	0.6	11	Lac naturel	RCS, Enquête	Bouche du Rhône (13)	Vents, Vandalisme
Entressen (ENT13)	0.9	10	4.8	-	36	Lac naturel	RCS, RCO	Bouche du Rhône (13)	Vents, Vandalisme
Quinson (QUI04)	1.7	28	11.6	5	434	Réservoir	RCO, Enquête	Alpes de Haute Provence (04)	Marnage
Lanous Anousse (LAN66)	1.7	55	40.7	33	2213	Réservoir	Référence, RCS, Enquête	Pyrénées Orientales (66)	Gel, Marnage
Estrade (EST11)	2.5	27	9.8	NA	229	Réservoir	RCS, Enquête	Aude (11)	Marnage
Raviège (RAV34)	4	37	11.1	20	662	Réservoir	RCS, Enquête	Hérault (34)	Marnage
Naussac (NAU48)	10.4	40	18.1	8	935	Réservoir	Référence, RCS	Lozère (48)	Marnage

Réseau de mesures thermiques en plans d'eau, C. Rondel, M. Daufresne, P.-A Danis

ANNEXES

Réseau de mesures thermiques en plans d'eau, C. Rondel, M. Daufresne, P.-A. Danis

Annexe 1 : Protocoles méthodologiques

Le protocole permettant d'obtenir le profil de température d'un lac peut être découpé en plusieurs points méthodologiques. Pour chaque point méthodologique, différentes options sont envisagées.

Ces options sont issues d'une étude des protocoles couramment appliqués pour le suivi thermique en plans d'eau. Parmi ces protocoles, une sélection de ceux qui répondent aux objectifs du réseau est proposée.

1. Echantillonnage de la colonne d'eau

- (1) - **Suivi 3C** : Suivi des 3 couches (épilimnion, métalimnion, hypolimnion) de la colonne d'eau à l'aide d'un seul enregistreur par couche.
- (2) - **Suivi All** : Suivi de l'ensemble de la colonne d'eau à partir de 0,25m sous la surface puis tous les mètres jusqu'au fond du plan d'eau.
- (3) - **Suivi EMH** : Suivi à partir de 0,25m sous la surface puis tous les mètres de la colonne d'eau jusqu'à la limite inférieure maximale du métalimnion estival, puis tous les 3 mètres dans l'hypolimnion.

2. Fréquence des mesures de température

- (1) - **Une mesure par heure** : Fréquence suffisante pour évaluer le régime thermique du plan d'eau.
- (2) - **Une mesure par quart d'heure** : Fréquence généralement utilisée dans les études s'intéressant au processus de stratification thermique.
- (3) - **Une mesure par minute** : Dans un objectif de suivi approfondi des courants internes des lacs, la fréquence peut être même inférieure à une mesure par minute.

3. Durée des mesures

- (1) - **Mesure en continue** : L'objectif du réseau est de suivre en continue pendant plusieurs années l'évolution des profils de température dans un lac.

4. Caractéristiques des appareils de mesures

Les spécifications métrologiques des caractéristiques des appareils de mesure sont la conséquence de l'exigence de précision dictée par les objectifs mais également des limites techniques. La gamme de mesure doit être comprise au minimum entre 0°C et 40°C. Deux critères métrologiques doivent être pris en compte (Exactitude¹, Résolution¹).

¹ Rappel des définitions du Vocabulaire international de métrologie (VIM).

Exactitude (accuracy): étroitesse de l'accord entre une valeur mesurée et une valeur vraie du mesurande
Résolution (resolution): plus petite variation de la grandeur mesurée qui produit une variation perceptible de l'indication correspondante

Fidélité de mesure (precision) : étroitesse de l'accord entre les valeurs mesurées obtenues par des mesurages répétés du même objet ou d'objets similaires dans des conditions spécifiées

Réseau de mesures thermiques en plans d'eau, C. Rondel, M. Daufresne, P.-A. Danis

Trois options sont envisagées¹ :

- (1) - **ER basse précision** : Exactitude= 1°C ; Résolution= 0,1°C
- (2) - **ER moyenne précision** : Exactitude= 0,5°C; Résolution= 0,05°C
- (3) - **ER haute précision** : Exactitude=0,005°C ; Résolution=0,0005°C

5. Position du mouillage des capteurs

- (1) - **Centroïde** : Le point géographiquement central du plan d'eau.
- (2) - **Loin des berges** : Le point le plus éloignés des berges calculé à l'aide des logiciels de géomatique.
- (3) - **Le plus profond** : A partir des données bathymétriques disponibles, le mouillage est installé au droit du point de plus grande profondeur.

6. Lieux annexes d'immersion de capteurs de température

- (1) - **Tributaires** : Aux niveaux des tributaires, l'installation se fera selon le protocole existant pour le réseau de température des cours d'eau.
- (2) - **Littorales** : A partir d'une sélection sur la base de critères hydromorphologiques, les installations se feront à proximité des berges et à une profondeur définie identique pour tous.

7. Capteurs annexes

Couramment, lorsque l'on s'intéresse au fonctionnement des plans d'eau, d'autres paramètres que la température sont récoltés. L'amélioration des techniques a permis d'automatiser la prise de mesure pour un certain nombre d'entre eux. Les plus utiles pour les objectifs potentiels du réseau sont décrits ci-après :

- (1) - **Pression** : Afin d'évaluer la profondeur exacte des mesures de température, un capteur de pression peut être utilisé.

Lors d'un long séjour sous l'eau, en plus du capteur de pression, il faut installer un capteur barométrique à proximité pour compenser la dérive instrumentale. Il doit être calibré régulièrement avec la pression atmosphérique. Le coût d'un capteur de pression est, au minimum, quatre fois plus élevé que celui d'un capteur de température.

- (2) - **Conductivité** : La conductivité varie en fonction de la profondeur. La faune et la flore évoluent dans une gamme précise de salinité/ conductivité.

Deux types d'appareils peuvent mesurer la conductivité *in situ*. Les sondes multi-paramètres (Constructeur YSI, NexSens, In-Situ inc.) ou les capteurs de température-conductivité (Constructeur ONSET). Ils peuvent être laissés *in situ* plus d'un an mais nécessitent un retour usine pour changer les piles. Le coût d'un

¹ Les valeurs indiquées sont à considérer comme les limites supérieures recherchées pour les appareils. Ces trois options sont choisies à partir d'une analyse bibliographique des études thermique, d'entretien auprès d'experts et du matériel disponible.

Réseau de mesures thermiques en plans d'eau, C. Rondel, M. Daufresne, P.-A. Danis

capteur de conductivité est de cinq à six fois plus élevé que le coût d'un capteur de température.

- (3) - **Oxygène** : La concentration en oxygène comme la température varie en fonction de la profondeur.

Deux moyens existent pour mesurer l'oxygène, les membranes semi-perméables qui sont fragiles et doivent être remplacées régulièrement, et des sondes optiques qui utilisent les propriétés de fluorescence d'un élément réagissant différemment selon la concentration d'oxygène dans le milieu. Ces appareils doivent être calibrés régulièrement hors site mais peuvent être laissés en place plus longtemps. Ils doivent être fréquemment nettoyés pour cause d'encrassement. *In situ*, l'oxygène peut être mesuré à l'aide d'une sonde multi-paramètres (e.g. constructeurs YSI, NexSens, In-Situ inc.) ou d'un capteur spécifique (e.g. constructeurs PME, In-Situ inc.). Le coût d'un capteur d'oxygène est, au minimum, dix fois plus élevé qu'un capteur de température.

- (4) - **Chlorophylle** : Elle permet d'évaluer la concentration en phytoplancton dans l'eau.

La mesure s'effectue par fluorimétrie *in situ*. Les capteurs doivent être régulièrement nettoyés. Ces appareils se retrouvent essentiellement sur des sondes multi-paramètres. Le coût d'un capteur est quinze fois plus élevé que celui d'un capteur de température.

- (5) - **pH** : Le pH est un bon indicateur des activités photosynthétiques. Comme les paramètres précédents et la température, il décrit un profil de stratification selon la profondeur.

La mesure se fait par une différence de potentiel entre l'électrode du milieu et une électrode baignant dans un milieu de référence. L'étalonnage et le nettoyage de l'appareil doivent se faire très régulièrement (recharge du liquide de référence). Les capteurs de pH sont retrouvés uniquement sur les sondes multi-paramètres (e.g. constructeurs YSI, NexSens, In-Situ inc.). Le coût de ces sondes est, au minimum, trois fois plus élevé que celui des capteurs températures mais n'existe pas en capteur individuel.

- (6) - **Transparence** : L'exposition au rayonnement solaire influe sur la température de l'eau et permet la photosynthèse.

Le PAR (Radiation Photosynthétiquement Active) est la gamme de rayonnement solaire mesuré dans l'eau. Les capteurs de PAR doivent être fréquemment nettoyés pour cause d'encrassement. Le coût est, au minimum, trente fois plus élevé que le coût d'un capteur de température sur une sonde multi-paramètres.

- (7) - **Turbidité** : Matière en suspension dans l'eau.

Mesurée à l'aide de la fluorescence. Ces capteurs sont retrouvés uniquement sur les sondes multi-paramètres (e.g. constructeurs YSI, NexSens, Turner design.). Le coût du capteur est environ dix fois plus élevé que le coût du capteur de température sur une sonde multi-paramètres.

Réseau de mesures thermiques en plans d'eau, C. Rondel, M. Daufresne, P.-A. Danis

8. Protocoles sélectionnés

Echantillonnage de la colonne d'eau :

A partir de 0, 25 m sous la surface de l'eau puis tous les mètres jusqu'à l'hypolimnion puis tous les 3 m jusqu'au fond.

L'épilimnion est la strate où vivent la plupart des espèces vivantes en surface, il est donc intéressant d'effectuer des mesures le plus proche possible de la surface. À partir de l'hypolimnion, le gradient de température varie peu avec la profondeur. Dans la plupart des études, les intervalles de mesures augmentent souvent à partir d'une certaine profondeur (thermocline). De plus, la mesure de température effectuée à faible profondeur permet potentiellement de valider les mesures de température de surface par les satellites. Avec une seule mesure par strate, il est impossible d'observer le fonctionnement thermique.

Il apparaît donc intéressant de ne tester que l'échantillonnage EMH. La difficulté étant de pouvoir identifier clairement la couche de l'hypolimnion. En effet, tous les lacs ne disposent pas de données de profils de température et les formules estimant la profondeur de la thermocline à partir de la force du vent ne paraissent pas forcément adaptées aux lacs français (voir le rapport de Camille Bouchez, 2010)

Fréquence des mesures de température :

Une mesure par quart d'heure

Plus la fréquence des mesures sera courte plus les besoins en stockage et traitement devront être importants. Pour ces raisons, il apparaît évident qu'effectuer une mesure toutes les minutes n'est pas un choix adapté aux objectifs du réseau.

Bien qu'une mesure toutes les heures ait l'avantage de se caler sur le réseau thermique des cours d'eau, demande moins de disponibilité mémoire et probablement une plus faible visite sur site (pour déchargement des données), il serait intéressant de tester les informations supplémentaires que pourrait amener la mesure tous les quarts d'heure. Pour cette raison, en phase test sur sites pilotes nous conseillons de choisir l'option d'une mesure tous les quarts d'heure puis d'identifier la meilleure des deux solutions pour le réseau.

Caractéristiques des appareils de mesures :

Appareil avec une exactitude minimum de 0,5°C et une résolution minimum de 0,05°C

Ce choix est un bon compromis entre les objectifs du réseau et les coûts des différents appareils.

Position du mouillage des capteurs :

Installation d'un mouillage au droit du lieu le plus profond et d'un mouillage le plus loin des berges.

Si cela est possible, nous conseillerons de faire les deux en phase de test. Dans les milieux fortement anthropisés, il est possible d'avoir une différence notable. Si ce n'est pas le cas, la première solution (mouillage au droit du lieu le plus profond) est prioritaire.

Lieux annexes d'immersion de capteurs de température:

Installation sur les tributaires

Il apparaît intéressant d'équiper les tributaires pour mieux identifier le fonctionnement de leurs échanges thermiques avec les plans d'eau. De plus, une partie des tributaires a déjà pu

Réseau de mesures thermiques en plans d'eau, C. Rondel, M. Daufresne, P.-A Danis

être équipée dans le cadre du suivi thermique des cours d'eau. La typologie hydromorphologique des zones littorales étant encore en cours de construction, il ne semble pas prioritaire d'équiper le littoral de capteurs supplémentaires.

Capteurs annexes:

Uniquement la température et exceptionnellement la pression

La plupart de ces capteurs demande un entretien et une demande énergétique plus importants. De plus, la fiabilité des mesures, notamment pour les capteurs de pH est fortement remise en cause si l'entretien n'est pas effectué correctement. Leur coût est également plus élevé que le coût des capteurs température. Il semble plus raisonnable de privilégier des mesures de température sur l'ensemble de la colonne d'eau plutôt que de multiplier les paramètres récoltés.

Cependant, de nouveaux capteurs de conductivité permettent une meilleure mesure de ce paramètre, voir permettent d'effectuer une mesure dans la colonne d'eau (*e.g.* capteurs de conductivité HOBO - U24-001). Cependant, son coût est six fois supérieur à celui d'un capteur de température. Dans le cas de lac avec une variation de niveau journalière importante, le capteur de pression sera une source précieuse d'information. Les autres paramètres nécessitent presque obligatoirement l'installation de système flottant manufacturé (figure 1). Plusieurs de ces bouées sont déjà disponibles (*e.g.* constructeurs YSI ou NexSens aux Etats-Unis, OTT en Allemagne, IDS-Monitoring en Irlande, NKE instrumentation en France).

Si les objectifs du réseau évoluent au-delà de l'observation du changement climatique, nous conseillons à l'ONEMA d'étudier l'installation de grandes bouées instrumentées avec des systèmes automatisés (voir ancien projet RENAT-EAU de l'ONEMA) et d'investir dans la recherche technologie les concernant. Il existe, en France, plusieurs projets de recherche concernant l'automatisation de mesures dans la colonne d'eau sur des bouées en milieu estuarien comme en milieu lacustre (*e.g.* projets LEO, PROLIPHIC ou SMATCH).

En conclusion, il est techniquement possible de mesurer en continue d'autres paramètres que la température, mais les coûts des appareils et de leur entretien sont très élevés. L'ONEMA pourra si elle le souhaite investir dans cette direction pour le réseau. Néanmoins, nous ne proposons pas de protocole sur ces paramètres pour l'instant et considérons uniquement l'évaluation de la température (sauf mesure de la pression dans des cas exceptionnels).

Bibliographie

Camille Bouchez. *Modélisation des températures de surface et de fond des plans d'eau*. Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie. CEMAGREF Aix en Provence: Université Pierre et Marie Curie, Ecole des Mines de Paris & Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, 2010.

Réseau de mesures thermiques en plans d'eau, C. Rondel, M. Daufresne, P.-A Danis

Annexe 2 : Aléas et contraintes

Les aléas et contraintes s'appliquant sur le réseau sont détaillés ici et résumés dans le tableau ci-après.

1. Environnement

(1) Vents

Sur les grands lacs en milieu ouvert, la houle peut risquer de submerger le matériel de mesure en surface. Les probabilités que la bouée coule sont faibles, néanmoins les batteries situées en surface ne sont pas toujours parfaitement étanches.

La ligne de mouillage en surface est soumise aux courants de convection induit par le vent, ce qui déplace l'ensemble du système de mesure sur le plan horizontal. Le câble se retrouvant incliné par rapport à la verticale, les profondeurs de mesures sont alors modifiées.

Les courants peuvent déplacer la bouée sur le lac, si celle-ci n'est pas correctement ancrée au fond. Si la bouée est retrouvée, des incertitudes sur les zones du lac échantillonnées demeurent.

(2) Neige/ Gel

Au moment du gel, les pressions exercées sur le matériel peuvent le détruire ou entraîner sa submersion.

Les mouvements des glaces causés par le vent au moment du dégel génèrent des mouvements de très grande amplitude et les tensions sur la ligne de mouillage et l'ancrage augmentent. Les profondeurs d'échantillonnage sont alors modifiées. Si la ligne d'amarrage se brise, il n'est plus possible de connaître la zone du lac échantillonné. Le système de mesure et les données qu'il contient peuvent être perdus.

Lorsque la glace recouvre un lac, l'accès au matériel de mesure est difficile et l'installation impossible. S'il n'a pas été possible de décharger les données avant le gel du plan d'eau et que la capacité de stockage arrive à saturation, la perte de données devient une éventualité.

Le rendement de fonctionnement des panneaux solaires (recharge pour batterie) est diminué par la neige et le gel. Les appareils doivent pouvoir supporter des conditions de température assez basses.

(3) Marnage

Sur certains plans d'eau, le marnage peut être très important (au-delà de 10 m d'oscillation). Dans ce cas, pour les mouillages situés en surface, la profondeur de la colonne d'eau échantillonnée varie.

(4) Nature du fond

Selon le type de fond, le type d'ancrage doit être adapté pour (i) permettre la stabilité du système au point de mesure et (ii) faciliter la récupération des données.

Réseau de mesures thermiques en plans d'eau, C. Rondel, M. Daufresne, P.-A Danis
(5) Biologique

Le matériel, mouillage et capteur, peut être colonisé par des éléments biologiques du plan d'eau.

2. Organisation

(6) Logistique

Les différents éléments du système doivent être installés et les données récupérées régulièrement. Ces manipulations impliquent une organisation et une formation du personnel technique qui, si elle n'est pas exécutée, se répercutera sur la qualité des données (perte, incohérence...).

Pour obtenir des données de qualité, il est nécessaire de vérifier régulièrement l'état du matériel et en particulier des appareils de mesure. Un profil de température manuel peut être fait chaque année lors de la récupération des données pour contrôler/quantifier les dérives éventuelles des capteurs.

(7) Liaison avec les autres réseaux

Parmi les lacs choisis dans le réseau, il est intéressant de vérifier s'ils n'appartiennent pas à un autre réseau de mesure. Ainsi, il sera possible d'éviter de refaire un travail déjà fait par ailleurs ou il sera possible de fédérer les efforts. De plus, s'il s'agit d'autres paramètres, cela permettra de compléter les informations de températures par ces paramètres.

3. Interaction avec les activités humaines

Pour la sécurité du matériel et des activités qui ont lieu sur le lac, il est important de prendre des précautions. Pour éviter le **vandalisme**, l'idéal serait de dissimuler le matériel, d'effectuer une surveillance régulière ou d'installer une alarme sur les systèmes.

Néanmoins, la dissimulation du matériel apparaît incompatible avec la **sécurité** des activités humaines sur les lacs (pêche, baignade, plaisance). Pour éviter la mise en danger et les dégâts matériels, il est essentiel de prévenir les gestionnaire du site de la mise en place du système de mesure de la température, d'avertir de la présence de matériel sous l'eau ou de faire que ce matériel n'empêche aucune activité (mouillage de sub-surface). Les gestionnaires se chargeront ensuite de sensibiliser les centres sportifs, les associations de pêcheurs et les autres usagers du plan d'eau.

Réseau de mesures thermiques en plans d'eau, C. Rondel, M. Daufresne, P.-A Danis
4. Tableau de synthèse

 Synthèse des aléas et contraintes principaux rencontrés
 dans le cadre de la mise en place d'un réseau de température en plan d'eau.

	Aléas	Contraintes	Niveau de contrainte ¹	Risques	Solutions techniques
<i><u>Environnement</u></i>	Vent	Submersion matériel	+	- Pertes de données - Perte de matériels	- Matériels étanches - Bouées insubmersibles
		Oscillation horizontale	+++	- Incertitudes sur l'échantillonnage - Entortillement des câbles	- Capteurs de pression - Double ancrage
		Rupture d'ancrage	+	- Incertitudes sur l'objet de mesure - Perte de données	- Ancrage adapté au fond
	Neige/ Gel	Alimentation énergétique	+	- Pertes de données	
		Oscillation horizontale	+++	- Incertitudes sur l'échantillonnage - Entortillement des câbles	- Capteurs de pression - Double ancrage
		Rupture d'ancrage	++	- Incertitudes sur l'objet de mesure - Perte de données	- Ancrage adapté au fond
		Difficultés d'accès	++	- Pertes de donnée	- Grande capacité de stockage de données - Gestion de la récupération adaptée
	Marnage	Oscillation vertical	+++	- Incertitude sur l'échantillonnage	- Capteurs de pression - Double ancrage - Mouillage « sub-surface »
	Nature du fond	Rupture d'ancrage	+	- Incertitudes sur l'objet de mesure - Pertes de données	- Ancrage adapté au fond
	Biologique	Encrassement capteur	++	- Augmente l'incertitude de la mesure	- Antifouling - Contrôles et entretiens
		Oiseaux	+	- Dégâts matériels - Pertes de données	- Surveillances régulières - Alarmes

¹ Le niveau de la contrainte est considéré comme un niveau de probabilité d'apparition de la contrainte pour un niveau d'aléas moyen (par exemple, une tempête donc des vents plus forts). A un niveau de gravité de contrainte inférieur, les risques énumérés sont déjà pris en compte pour le matériel et donc faibles.
 Echelle de risque: peu probable (+), probable (++), inévitable (+++).

Réseau de mesures thermiques en plans d'eau, C. Rondel, M. Daufresne, P.-A Danis

	Aléas	Contraintes	Niveau de contrainte ¹	Risques	Solutions techniques
<u>Organisation</u>	" Logistique "	Mise à l'eau	+++	- Difficultés de manutention - Difficultés d'installation	- Solution légère
		Relevage du mouillage	+++	- Impossibilité d'effectuer le relevage (pb ancrage dû à la nature du fond) - Pas de repérage du mouillage - Difficultés de manutention du matériel - Ruptures mouillage	- Capacité de stockage de données adaptée - Ancrage adapté - Prévoir plongeur - Signalisation du matériel - Solution légère - Mouillages et appareillages adaptés - Pertes de données
		Récupération des données	+++	- Erreurs manipulations - Matériels usagés	- Solutions simples - Vérifications régulières
		Entretien	+++	- Usures accélérées du matériel - Pertes de données	- Matériels longues durées - Services après vente
		Liaison autres réseaux	++	- Double emploi	- Vérification préalable
<u>Interaction activités humaines</u>	Vandalisme		+	- Dégâts matériels - Perte de données	- Dissimulation du matériel - Surveillance régulière - Alarmes
	Sécurité	Bateau/ baigneurs/ filet de pêche	++	- Mise en danger de personne - Dégâts matériels - Perte de données	- Signalisation du matériel - Avertissement autorité - Mouillage en « sub-surface »

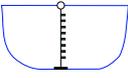
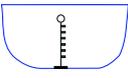
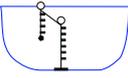
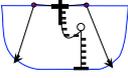
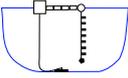
¹ Le niveau de la contrainte est considéré comme un niveau de probabilité d'apparition de la contrainte pour un niveau d'aléas moyen (e.g. une tempête donc des vents plus forts). A un niveau de gravité de contrainte inférieure, les risques énumérés sont déjà pris en compte pour le matériel et donc faibles.
 Echelle de risque: peu probable (+), probable (++), inévitable (+++).

Réseau de mesures thermiques en plans d'eau, C. Rondel, M. Daufresne, P.-A. Danis

Annexe 3 : Lignes de mouillage

L'inspiration d'une partie des solutions proposées ci-dessous provient du document réalisé par Jean-Pierre Girardot (2001): techniques des mouillages utilisés en océanographie, Laboratoire de physique des océans, Université de Bretagne occidentale.

Avantages et inconvénients des différentes lignes de mouillage illustrés en annexe.

	Avantages	Inconvénients
Surface 	<ul style="list-style-type: none"> • Visibilité du mouillage • Mesure de la surface jusqu'au fond 	<ul style="list-style-type: none"> • Risques de collision et vandalisme • Tenue du mouillage plus difficile à assurer, en particulier sur des plans d'eau à fort marnage. • Contrôles réguliers de l'usure du mouillage nécessaire: les mouvements en surface exercent des tensions sur les éléments du mouillage. • Bruits importants sur les mesures (potentielle compensation par installation de capteurs de pression)
Sub-surface 	<ul style="list-style-type: none"> • A l'abri des collisions avec les embarcations • Elimine les problèmes dus aux mouvements de la surface de l'eau (usure : ragage¹ et surtension sur la ligne) 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de mesure proche de la surface • Nécessite un positionnement précis lors de la mise à l'eau et de la récupération (→ augmente le risque de perte du matériel). • L'étape de récupération est cruciale (utilisation d'un largueur acoustique²?).
Anti-Marnage 1 	<ul style="list-style-type: none"> • Visibilité du mouillage • Mesure de la surface jusqu'au fond • Si le lest est important, faible inclinaison des capteurs 	<ul style="list-style-type: none"> • Risques de collision et vandalisme • Contraintes fortes sur la liaison bouée de surface et « sub-surface ». • Bruits importants sur les mesures (tenue du mouillage plus faible) • L'étape de récupération est cruciale (utilisation d'un largueur acoustique²?).
Anti-Marnage 2 	<ul style="list-style-type: none"> • Visibilité du mouillage • Mesure de la surface jusqu'au fond • Stabilise les mesures (ancrage) 	<ul style="list-style-type: none"> • Risques de collision et vandalisme • Contraintes fortes sur la liaison bouée de surface et « sub-surface ». • L'étape de récupération est cruciale (utilisation d'un largueur acoustique²?).
Anti-Marnage 3 	<ul style="list-style-type: none"> • Visibilité du mouillage • Mesure de la surface jusqu'au fond • Accès facilités aux matériels de mesure • Si le lest est important, faible inclinaison des capteurs 	<ul style="list-style-type: none"> • Risques de collisions et vandalismes forts. • Fragilité de la liaison entre la bouée principale et satellite (→ durée de mesure plus faible). • Bruits importants sur les mesures.

¹ Ragage : Usure du cordage par le frottement.

² Largueur acoustique : système de largage installé entre l'ancre et les instruments. A réception d'une commande émise depuis la surface le largueur libère une ligne avec flotteur qui remonte en surface et peut ainsi être récupérer.

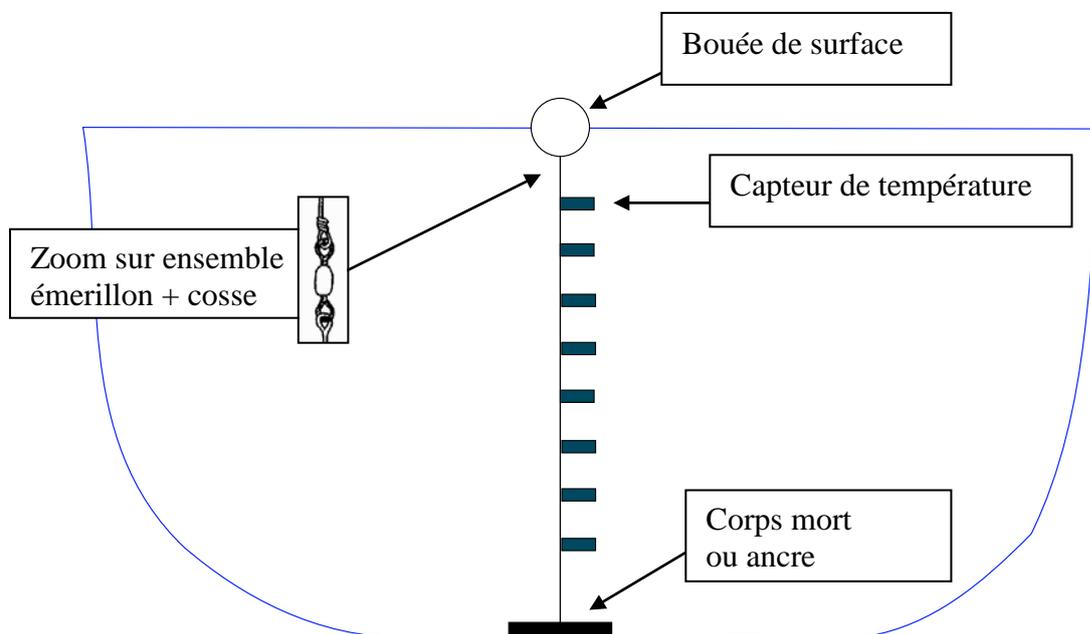


Figure 1 : Ligne de mouillage simple avec flottabilité de surface

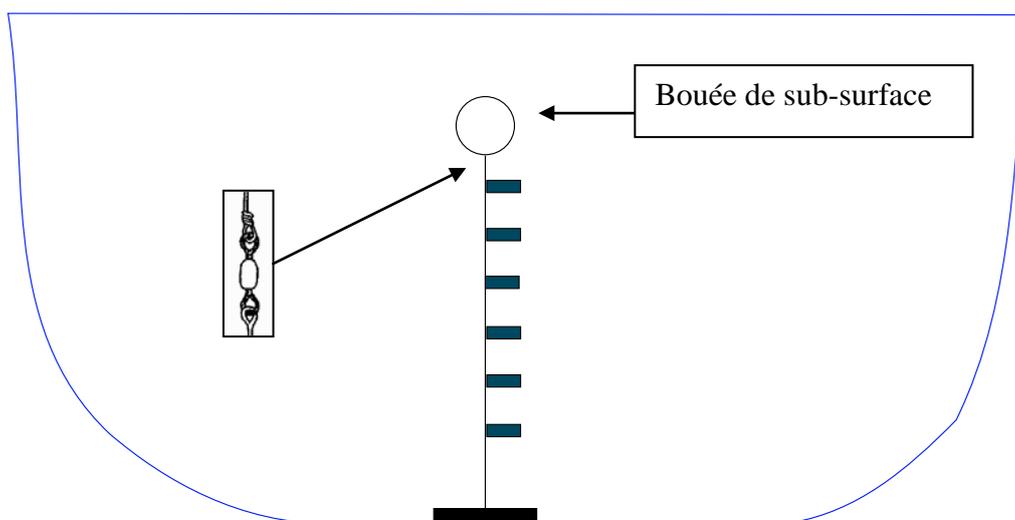


Figure 2: Ligne de mouillage avec flottabilité de subsurface

Réseau de mesures thermiques en plans d'eau, C. Rondel, M. Daufresne, P.-A Danis

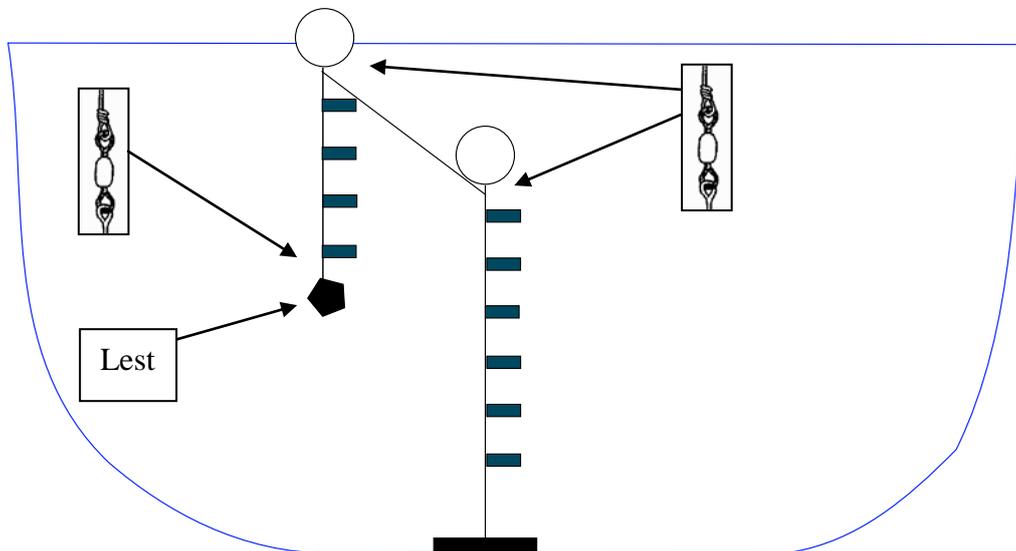


Figure 3: Ligne de mouillage combinant mesure de surface et marnage (Anti-marnage 1)

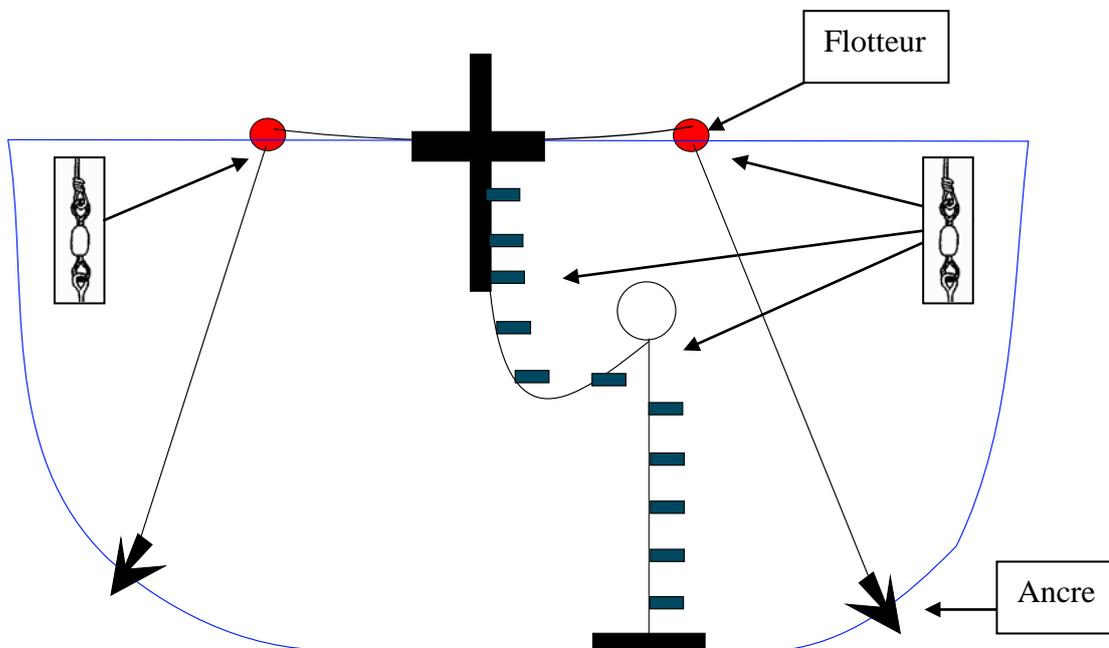


Figure 4: Ligne de mouillage permettant de gérer le marnage et la dérive potentiel du matériel

Réseau de mesures thermiques en plans d'eau, C. Rondel, M. Daufresne, P.-A Danis

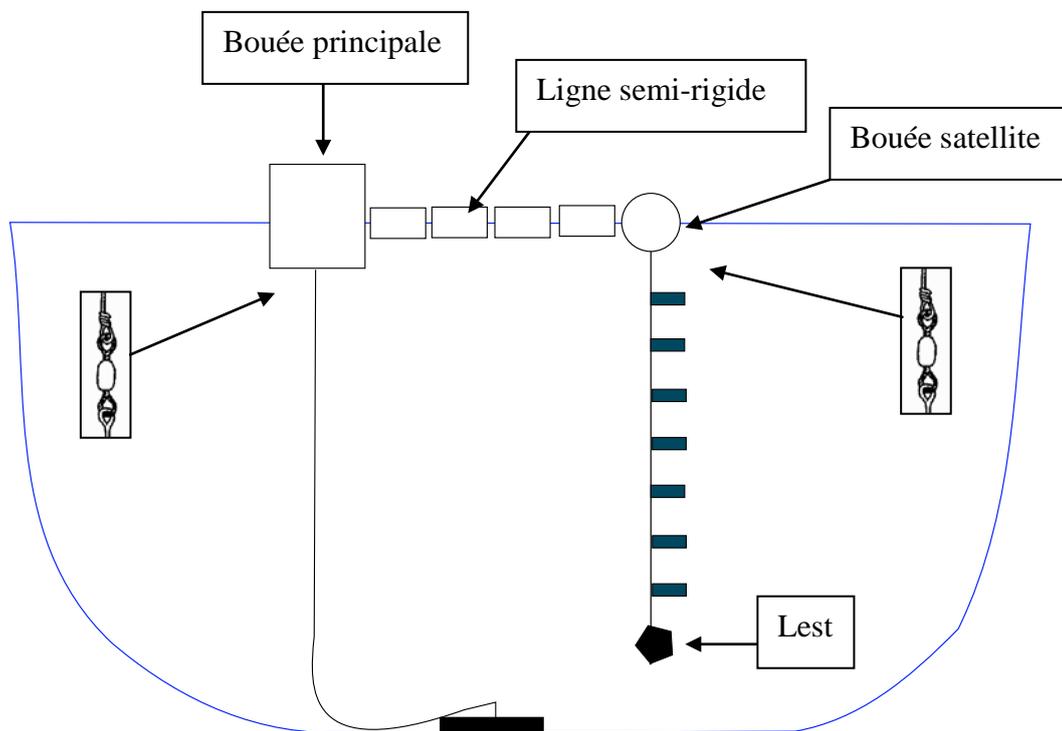


Figure 5: Ligne de mouillage permettant de gérer le marnage et la dérive potentiel du matériel

Réseau de mesures thermiques en plans d'eau, C. Rondel, M. Daufresne, P.-A Danis

Annexe 4 :

Evaluation des coûts de fonctionnement du réseau

L'évaluation du coût de fonctionnement est une estimation grossière des coûts. Les risques d'erreurs sur les approximations et les hypothèses de travail, notamment du temps nécessaire pour l'entretien, la formation ou sur le prix des matériaux utilisés, sont possibles. Une rediscussions approfondie avec le personnels de l'ONEMA et les fournisseurs de matériels sera nécessaire pour valider ces estimations.

1. Coûts du matériel

La profondeur est le facteur ayant le plus d'influence sur le coût du matériel. Pour le calcul des coûts, nous avons considéré l'exemple d'un lac théorique dont la profondeur est située dans la partie haute de la distribution soit 30 mètres (cf. tableau ci-dessous pour le détail de la distribution). Tous les prix indiqués par la suite sont à considérer hors taxe.

Quartiles des distributions de caractéristiques morphologiques des lacs et réservoirs présents dans la base de données gérée au pôle plans d'eau..

Quartile	Superficie (km ²)	Altitude (m)	Périmètre (m)	Marnage (m)	Profondeur maximum (m)	Profondeur moyenne (m)
0.25	0.3	350	3276	1	7	3
Médiane	0.6	525	5575	4	15	6
0.75	1.2	800	11227	11	29	12

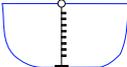
L'installation se fait sur un lac de 30 mètres de profondeur maximum et subissant un marnage de 10 mètres. On considèrera que la profondeur maximale du métalimnion se situe à 10 mètres sous la surface.

1.1. Acquisition manuelle des données

Mouillage en surface

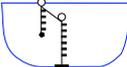
Le coût de base de ces systèmes de bouée est de **501 €** auquel doit être ajouté le coût du système de mesure (fonction du nombre de capteurs). Pour une série de mesures, on peut estimer un coût de **104 €**(cf. tableau ci-dessous pour le détail).

Réseau de mesures thermiques en plans d'eau, C. Rondel, M. Daufresne, P.-A Danis

	Détails	Px. H.T. en €
<u>Système de flottaison</u>	Bouée de surface (Ø450 mm, Flottabilité utile 31.5 kg)	125
	1 ensemble émerillon+cosse	21
	1 cosse	7
	1 Ancrage (Ancre+chaîne+attaches)	171
<u>Système de mesure</u>	26 Enregistreurs HOBO U22 Water pro (Exactitude= +/- 0.2 °C, Résolution= 0.02°C)	2600
	Cordage (Ø16 mm, long. 30 m, polyamide)	95
<u>Alimentation en énergie</u>	Batterie intégré capteur	0
<u>Système de stockage</u>	Stockage intégré capteur	0
	Transmission des données (Navette HOBO U-DTW-1)	177
Total		3196

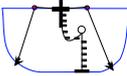
Mouillage anti-marnage 1

Le coût de base de ces systèmes de bouée est de **685 €** auquel doit être ajouté le coût du système de mesure (fonction du nombre de capteurs). Pour une série de mesures, on peut estimer un coût de **105 €**(cf. tableau ci-dessous pour le détail).

	Détails	Px. H.T. en €
<u>Système de flottaison</u>	Bouée de surface (Ø450 mm, Flottabilité utile 31.5)	125
	Bouée de sub-surface (Ø450 mm, Flottabilité utile 31.5)	125
	3 ensembles émerillon+cosse	63
	2 cosses	14
	1 poids	10
	1 Ancrage (Ancre+chaîne+attaches)	171
<u>Système de mesure</u>	26 Enregistreurs HOBO U22 Water pro(Exactitude= +/- 0.2 °C, Résolution= 0.02°C)	2600
	Cordage (Ø16 mm, long. 40 m, polyamide)	126
<u>Alimentation en énergie</u>	Batterie intégré capteur	0
<u>Système de stockage</u>	Stockage intégré capteur	0
	Transmission des données (Navette HOBO U-DTW-1)	177
Total		3411

Réseau de mesures thermiques en plans d'eau, C. Rondel, M. Daufresne, P.-A Danis
Mouillage anti-marnage 2

Le coût de base de ces systèmes de bouée est de **876 €** auquel doit être ajoutée le coût du système de mesure (fonction du nombre de capteur). Pour une série de mesure, on peut estimer un coût de **104 €** (cf. tableau ci-dessous pour le détail).

	Détails	Px. H.T. en €
<u>Système de flottaison</u>	Bouée de surface (Ø450 mm, Flottabilité utile 31.5)	125
	Bouée de sub-surface (Ø450 mm, Flottabilité utile 31.5)	125
	4 ensemble émerillon+cosse	84
	2 flotteurs	16
	1 cosse	7
	2 Ancrages (Ancre+chaîne+attaches)	342
<u>Système de mesure</u>	26 Enregistreurs HOBO U22 Water pro (Exactitude= +/- 0.2 °C, Résolution= 0.02°C)	2600
	Cordage (Ø16 mm, long. 32 m polyamide)	101
<u>Alimentation en énergie</u>	Batterie intégré capteur	0
<u>Système de stockage</u>	Stockage intégré capteur	0
	Transmission des données (Navette HOBO U-DTW-1)	177
Total		3577

1.2. Acquisition automatiques des données

Nous n'avons eu à notre disposition que le devis de la société PME.

Bouée instrumentée pensée contre le marnage

Construit au Canada par la société PME, le lake ESP permet de gérer le marnage sur les plans d'eau. Ce système a deux inconvénients majeurs par rapport aux cahiers des charges fonctionnels : la résistance aux vents et aux gels semblent faibles. Le lake ESP est généralement utilisé à partir d'un marnage supérieur à 5 mètres. Le montant des abonnements GSM et des serveurs de stockage externe nécessaires pour la télétransmission ne sont pas pris en compte dans l'évaluation des coûts.

Le montant pour le système de flottaison (45% du montant total) est plus important que celui du système de mesure (40% du montant total). Pour des lacs moins profonds, le nombre de capteurs diminue comme le coût de la chaîne de thermistances. Le système de flottaison est donc la dépense la plus importante. La fragilité du système face aux vents et gels (non testé) nous laisse à penser que les remplacements de matériel risquent d'être assez courants. Un capteur température défectueux sur la chaîne implique automatiquement le remplacement de la chaîne de thermistances dans sa globalité.

Réseau de mesures thermiques en plans d'eau, C. Rondel, M. Daufresne, P.-A Danis

Le coût de base de ces systèmes de bouée est de **13 313 €** auquel doit être ajouté le coût du système de mesure (fonction du nombre de capteurs). Pour une mesure, on peut estimer un coût de **363 €** (cf. tableau ci-dessous pour le détail).

Bouée instrumentée Lake ESP de PME	Détails	Px. H.T.¹ en €
<u>Système de flottaison</u>	Charpente de la bouée	6477
	Structure flottante	655
	Ligne de mouillage stabilisante (Anti-marnage)	2466
	Autres (protection oiseaux, câbles...)	424
	Ancrage ² (ancre, manille, chaîne)	171
<u>Système de mesure Chaîne de thermistance</u>	26 capteurs (Exactitude= +/- 0.01 °C, Résolution= 0.0005°C)	8420
	28m de câble de connexion + 3 m pour lier à l'enregistreur enregistreur	287
	Mouillage Chaîne thermistance	478
	Connecteurs étanches	254
<u>Alimentation en énergie</u>	Panneaux solaires	216
<u>Système de stockage Télétransmission</u>	Transmetteurs GSM	925
	Stockage de données en surface	1928
<u>Manutention & Emballage</u>		193
Total		22 752

1.3. Coûts matériels pour un réseau fictif

Pour évaluer l'investissement nécessaire au lancement du réseau nous partons des hypothèses suivantes :

+ 20 lacs qui seront équipés en fonction de leur profondeur maximale.

¹ Les prix en euros sont convertis des montants en dollar. Les frais d'importation ne sont pas pris en compte.

² Non fourni par le constructeur

Réseau de mesures thermiques en plans d'eau, C. Rondel, M. Daufresne, P.-A Danis

+ Un quart des lacs marne et tous les lacs qui marnent ont une profondeur maximale supérieure à 7 mètres.

Les lacs qui ne marnent pas seront équipés d'un système « fait-main » avec bouée de surface. Pour les lacs soumis à marnage, trois solutions sont possibles (solutions anti-marnage « fait-main » 1, 2 ou équipement lac ESP). Nous présentons donc trois coûts finaux en fonction de la solution anti-marnage appliquée sur le lac.

Rappel des coûts estimés en euros pour chaque système

	Coût fixe	Coût d'une mesure
Bouée de surface	501	104
Anti-marnage 1	685	105
Anti-marnage 2	876	104
Lake ESP	13313	363

Calcul des coûts en euros des différents systèmes selon les hypothèses proposés pour le réseau. Les coûts pour le réseau sont en italique.

Profondeur maximale du lac	Epaisseur du métalimnion	Epaisseur de l'hypolimnion	Nbr de lacs non marnant	Nbr de lacs marnant	Bouée de surface	Anti-marnage 1	Anti-marnage 2	Lake ESP
7 m	4 m	3 m	5	0	<i>5 105</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
15 m	10 m	5 m	3.4	1.6	<i>5 829</i>	<i>3 056</i>	<i>3 343</i>	<i>28 077</i>
29 m	20 m	9 m	3.3	1.7	<i>9 547</i>	<i>5 270</i>	<i>5 556</i>	<i>36 825</i>
60 m	40 m	20 m	3.3	1.7	<i>17 669</i>	<i>9 495</i>	<i>9 740</i>	<i>51 430</i>
				<i>Total</i>	<i>38 150</i>	<i>17 821</i>	<i>18 638</i>	<i>116 332</i>

Synthèse des coûts du matériel en euros pour chacune des options proposées.

Options de gestion du marnage	Bouée de surface	Anti-marnage 1	Anti-marnage 2	Lake ESP	Coût total du matériel du réseau
Bouée de Surface + Anti-marnage 1	38 150 €	17 821 €			55 970 €
Bouée de Surface + Anti-marnage 2	38 150 €		18 638 €		56 788 €
Bouée de Surface + Lake ESP	38 150 €			116 332 €	154 482 €

1.4. Pièces de rechange

Nous considérons un stock de matériel équivalent à 20 % des investissements matériel de départ. Pour simplifier nos calculs, nous appliquons les 20% sur le coût total du matériel du réseau et non simplement sur les systèmes de mesures des appareillages. En faisant ce choix, nous surévaluons les coûts des stocks.

Réseau de mesures thermiques en plans d'eau, C. Rondel, M. Daufresne, P.-A Danis

Synthèse des coûts des pièces de rechange pour chacune des options proposées.

Options de gestion du marnage	Coût total du matériel du réseau	Coûts des pièces de rechanges
Bouée de Surface + Anti-marnage 1	55 970 €	11 194 €
Bouée de Surface + Anti-marnage 2	56 788 €	11 358 €
Bouée de Surface + Lake ESP	154 482 €	30 896 €

1. Coûts organisationnels

Les coûts organisationnels ne comprennent pas le temps des déplacements jusqu'au site de mesures et les étapes de repérage préalable des sites. Les estimations du temps passé sur place pour chaque opération devront être rediscutées et vérifiées auprès des ingénieurs et techniciens de l'ONEMA ainsi qu'avec les constructeurs pour les bouées instrumentées. Les coûts horaires sont des estimations provisoires que nous ont transmises les agents de l'ONEMA, elles sont comprises hors taxe et peuvent être soumises à modifications.

2.1. Acquisition manuelle des données

Coût d'exploitation du réseau par lac et par an : 500 €

Dépenses spécifiques (mise en route du réseau et exception) : 1 040€

Détails des coûts en personnel par étape de fonctionnement du réseau

Réseau	Opération	Périodicité	Personnel	Nbr	Durée (jours)	Tarifs journaliers ¹	Coût total
Installation	Montage et branchement	1 fois / 10 ans	Technicien	2	1/2	400€	400
	Mise en place <i>in situ</i>	1 fois / 10 ans	Technicien	2	1/4	400€	200€
	Transport	1 fois /an	-	-	Inclus tarifs journaliers ¹	-	-
Exploitation sur site	Déchargement	1 fois /an	Technicien	2	1/8	400€	100€
	Maintenance	1 fois /an	Technicien	2	1/2	400€	400€
	Transport	1 fois /an	-	-	Inclus tarifs journaliers ¹	-	-
	Travaux sub-aquatiques	Exceptionnel	Plongeur	1	1/2	480€	240€
Formation	A l'installation	1 fois / 10 ans	Ingénieur	1	1	450€	450€
	A la maintenance	1 fois / 5 ans	Ingénieur	1	1/2	450€	225€
	Au déchargement	1 fois / 5 ans	Ingénieur	1	1/2	450€	225€

¹ Le tarif journalier est donné en euros hors taxe pour une journée de travail. Il comprend les frais de fonctionnement soit le transport (bateau et voiture), les repas et les défraiements.

Réseau de mesures thermiques en plans d'eau, C. Rondel, M. Daufresne, P.-A Danis

2.2. Acquisition automatiques des données

Coût d'exploitation du réseau par lac et par an : 500 €

Dépenses spécifiques (mise en route du réseau et exception) : 1 265 €

Détails des coûts en personnel par étape de fonctionnement du réseau

Réseau	Opération	Périodicité	Personnel	Nbr	Durée (jours)	Tarifs journaliers ¹	Coût total
Installation	Montage et branchement	1 fois / 10 ans	Technicien	2	1/2	400€	400
	Mise en place in situ	1 fois / 10 ans	Technicien	2	1/4	400€	200€
	Transport	1 fois /an	-	-	Inclus tarifs journaliers ¹	-	-
Exploitation sur site	Déchargement (par télétransmission)	1 fois /mois		0	0	0€	0€
	Maintenance	1 fois /an	Technicien	2	5/8	400€	500€
	Transport	1 fois /an	-	-	Inclus tarifs journaliers ¹	-	-
	Travaux sub-aquatiques	Exceptionnel	Plongeur	1	1/2	480€	240€
Formation	A l'installation	1 fois / 10 ans	Ingénieur	1	1	450€	450€
	A la maintenance	1 fois / 5 ans	Ingénieur	1	1	450€	450€
	Au déchargement	1 fois / 5 ans	Ingénieur	1	1/2	450€	225€

2.3. Coûts organisationnels pour un réseau fictif

Nous reprenons les hypothèses du paragraphe précédent :

+ 20 lacs qui seront équipés en fonction de leur profondeur maximale.

+ Un quart des lacs marne et tous les lacs qui marnent ont une profondeur maximale supérieure à 7 mètres.

Trois possibilités d'équiper le lac en fonction du système anti-marnage choisi.

Calcul en euros des coûts d'exploitation annuelle en euros du réseau

Profondeur maximale du lac	Nbr de lacs non marnant	Nbr de lacs marnant	Bouée de surface	Anti-marnage 1	Anti-marnage 2	Lake ESP
7 m	5	0	2 500	0	0	0
15 m	3.4	1.6	1 700	800	800	800
29 m	3.3	1.7	1 650	850	850	850
60 m	3.3	1.7	1 650	850	850	850
		<i>Total</i>	<i>7500</i>	<i>2500</i>	<i>2500</i>	<i>2500</i>

¹ Le tarif journalier est donné en euros hors taxe pour une journée de travail. Il comprend les frais de fonctionnement soit le transport (bateau et voiture), les repas et les défraiements.

Réseau de mesures thermiques en plans d'eau, C. Rondel, M. Daufresne, P.-A Danis

Synthèse des coûts organisationnels en euros pour chacune des options proposées.

Options de gestion du marnage	Bouée de surface	Anti-marnage 1	Anti-marnage 2	Lake ESP	Dépenses spécifiques « fait- main »	Dépenses spécifiques acquisition automatique	Coût total du matériel du réseau
Bouée de Surface + Anti-marnage 1	7 500 €	2 500 €			1040 €		11 040 €
Bouée de Surface + Anti-marnage 2	7 500 €		2 500 €		1040 €		11 040 €
Bouée de Surface + Lake ESP	7 500 €			2 500 €	1040 €	1265 €	12 305 €

Réseau de mesures thermiques en plans d'eau, C. Rondel, M. Daufresne, P.-A Danis

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

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