

**Normes et procédures pour la collecte de données de  
température de l'eau en continu dans les cours d'eau**

**Environnement Canada / INRS-ETE  
Revue de littérature**

**Rapport de recherche R-1730  
2017**

Normes et procédures pour la collecte de données de température de l'eau en continu dans les cours d'eau

**Normes et procédures pour la collecte de données de température de  
l'eau en continu dans les cours d'eau**

**par**

**Joannie Beaupré  
André St-Hilaire  
Anik Daigle  
Claudine Boyer  
Normand Bergeron**

**Environnement Canada  
Institut national de la recherche scientifique (INRS)  
Centre Eau, Terre et Environnement  
490 de la Couronne, Québec (Québec) G1K 9A9**

**Rapport de recherche R-1730**

**2017**

**Référence**

Beaupré, J., St-Hilaire, A., A. Daigle, C. Boyer, N.E. Bergeron. 2016. Normes et procédures pour la collecte de données de température de l'eau en continu dans les cours d'eau. Rapport de recherche R-1730, iv+43 pages.

© INRS-ETE, 2017

Tous droits réservés

ISBN : 978-2-89146-879-4 (version électronique)

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2017

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives Canada, 2017

# TABLE DES MATIÈRES

---

<b>TABLE DES MATIÈRES</b> .....	<b>I</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>III</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>IV</b>
<b>1 INTRODUCTION</b> .....	<b>5</b>
1.1 MISE EN CONTEXTE .....	5
<b>2 OBJECTIFS DU SUIVI THERMIQUE</b> .....	<b>7</b>
<b>3 CONCEPTION DU RÉSEAU DE SUIVI</b> .....	<b>8</b>
3.1 CHOIX ET NOMBRE DE SITES .....	8
3.2 CHOIX DU DISPOSITIF .....	10
3.2.1 <i>Thermographes sans fil</i> .....	10
3.2.2 <i>Les sondes de température connectées à une station fixe en berge</i> .....	12
3.2.3 <i>Les dispositifs satellites et «Bluetooth»</i> .....	13
<b>4 ÉLABORATION DES PROTOCOLES D'ÉCHANTILLONNAGE</b> .....	<b>15</b>
4.1 FRÉQUENCE D'ÉCHANTILLONNAGE .....	15
4.2 DURÉE DE L'ÉCHANTILLONNAGE .....	16
4.3 RÉPLICATION .....	16
4.4 TESTS DE PRÉCISION PRÉ-DÉPLOIEMENT .....	17
4.5 MATÉRIEL ET PROTOCOLES D'INSTALLATION .....	18
4.6 LANCEMENT DES THERMOGRAPHES .....	20
<b>5 DÉPLOIEMENT DES THERMOGRAPHES</b> .....	<b>22</b>
5.1 DÉPLOIEMENT INITIAL .....	22
5.1.1 <i>Emplacement des thermographes</i> .....	22
5.1.2 <i>Métadonnées</i> .....	24
5.2 ENTRETIEN DURANT LE DÉPLOIEMENT .....	26
5.2.1 <i>Vérification</i> .....	26
5.2.2 <i>Téléchargement des données et changement de pile</i> .....	27
5.2.3 <i>Métadonnées</i> .....	27
5.3 RÉCUPÉRATION DU THERMOGRAPHE ET DES DONNÉES .....	28
5.3.1 <i>Métadonnées</i> .....	28
5.3.2 <i>Lectures des thermographes</i> .....	28
5.3.3 <i>Tests de précision</i> .....	28
5.3.4 <i>Nettoyage des thermographes</i> .....	29
<b>6 CONTRÔLE DE QUALITÉ DES DONNÉES RÉCOLTÉES</b> .....	<b>30</b>
6.1 BASES DE DONNÉES .....	31
6.1.1 <i>Inspection visuelle avec une série de données unique</i> .....	31
6.1.2 <i>Comparaisons avec diverses séries de données</i> .....	35
6.1.3 <i>Tris automatiques</i> .....	38
6.1.4 <i>Corrections</i> .....	41
6.2 MESURES ACHÉMINÉES EN TEMPS RÉEL (OU PRESQUE) .....	42

<b>7</b>	<b>ENTREPOSAGE DES DONNÉES</b> .....	<b>44</b>
<b>8</b>	<b>CONCLUSION</b> .....	<b>46</b>
<b>9</b>	<b>RÉFÉRENCES</b> .....	<b>48</b>
	<b>ANNEXE 1. CARACTÉRISTIQUES DES THERMOGRAPHES COURAMMENT UTILISÉS EN RIVIÈRE.</b> .....	<b>31</b>
	<b>ANNEXE 2. EXEMPLE DE TABLEAU POUR LE SUIVI DES TESTS DE PRÉCISION DES</b> <b>THERMOGRAPHES</b> .....	<b>33</b>
	<b>ANNEXE 3. PROTOCOLE D’INSTALLATION DES THERMOGRAPHES.</b> .....	<b>34</b>
	<b>ANNEXE 4 EXEMPLE DE FEUILLE DE MÉTADONNÉES POUR LES PROCÉDURES DE</b> <b>DÉPLOIEMENT</b> .....	<b>38</b>
	<b>ANNEXE 5 : EXEMPLE DE FEUILLE DE MÉTADONNÉES POUR LES PROCÉDURES DE SUIVI ET DE</b> <b>RÉCUPÉRATION</b> .....	<b>40</b>
	<b>ANNEXE 6. MATÉRIEL DE TERRAIN</b> .....	<b>42</b>

## LISTE DES TABLEAUX

---

TABLEAU A 1: COMPARAISON DE PLUSIEURS MARQUES ET MODÈLES DE THERMOGRAPHES SUBMERSIBLES.....	31
TABLEAU A 2 : LISTE DU MATÉRIEL DE TERRAIN À PRÉVOIR POUR L'INSTALLATION DES THERMOGRAPHES ET LA PRISE DE MÉTADONNÉES (TABLEAU MODIFIÉ DE DAIGLE <i>ET AL.</i> , 2016A).....	42

# LISTE DES FIGURES

---

FIGURE 1 : DIFFÉRENTS MODÈLES DE THERMOGRAPHES SANS FIL. A) HOBO® U22-001 WATER TEMP PRO v2 B) HOBO® TIDBIT v2 WATER TEMP C) HOBO® PENDANT TEMP/LIGHT 64 KB D) MINILOG II-T TEMP E) TINYTAG AQUATIC 2 (TG-4100) F) VERITEQ 1000/1400 SERIES .....	12
FIGURE 2 : SYSTÈME D'ACQUISITION DE DONNÉES SITUÉ SUR LA BERGE, CONNECTÉ AVEC UNE SONDE DANS LE COURS D'EAU .....	14
FIGURE 3: EXEMPLE D'ENDROITS STRATÉGIQUES OÙ POSITIONNER LES THERMOGRAPHES DANS UN COURS D'EAU SELON WARD (2011). .....	23
FIGURE 4 : EXEMPLE DES VARIATIONS DIURNE ET SAISONNIÈRE DE LA TEMPÉRATURE DE L'EAU PRISE PAR UN THERMOGRAPHE FONCTIONNANT NORMALEMENT, INSTALLÉ DANS LA RIVIÈRE OUELLE PRÈS DE LA POCATIÈRE, RÉGION DU BAS-SAINT-LAURENT, QUÉBEC, DE MARS À DÉCEMBRE 2014.....	31
FIGURE 5 : DONNÉES DE TEMPÉRATURE DE L'EAU D'UN RUISSEAU DE PREMIER ORDRE DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE CAP-ROUGE EN OCTOBRE 2016 À QUÉBEC, INCLUANT LES DONNÉES DE TEMPÉRATURE DE L'AIR PRÉ- ET POST-DÉPLOIEMENT À ÉLIMINER.....	32
FIGURE 6 : DONNÉES DE TEMPÉRATURE, INCLUANT DES DONNÉES OU LE THERMOGRAPHE ÉTAIT EXONDÉ DANS LA RIVIÈRE KADASHAN PRÈS DE TENAKEE EN ALASKA, JUIN-JUILLET 1998.....	33
FIGURE 7 : DONNÉES DE TEMPÉRATURE MONTRANT UN ENSEVELISSEMENT RÉPÉTITIF D'UN THERMOGRAPHE DANS LA RIVIÈRE UNUK PRÊT DE WRANGELL, ALASKA, JUILLET-AOÛT 2003.....	34
FIGURE 8 : DONNÉES DE TEMPÉRATURE DE L'EAU INCLUANT DES DONNÉES ERRONÉES D'UN THERMOGRAPHE ENROBÉ DANS UNE COUCHE DE GLACE DANS LE RUISSEAU UPPER EARL WEST PRÊT DE WRANGELL EN ALASKA, DÉCEMBRE 2004 À JANVIER 2005. ....	35
FIGURE 9 : DONNÉES DE TEMPÉRATURE DE L'EAU ET DE L'AIR POUR LE MOIS D'OCTOBRE 2016 SUR UN SITE URBAIN SITUÉ SUR LE BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE CAP-ROUGE, À QUÉBEC,. LE CHEVAUCHEMENT ENTRE LES TEMPÉRATURES DE L'EAU ET DE L'AIR SUGGÈRE UNE EXONDATION. ....	37
FIGURE 10 : DONNÉES DE TEMPÉRATURE DE DEUX RÉPLICATS POUR LE MOIS D'OCTOBRE 2016 DANS UN RUISSEAU URBAIN SITUÉ DANS LE BASSIN VERSANT LA RIVIÈRE CAP-ROUGE, À QUÉBEC. L'ÉCART OBSERVÉ ENTRE LES TEMPÉRATURES DES DIX PREMIERS JOURS INDIQUE UNE ANOMALIE POUR UN DES DEUX THERMOGRAPHES. ....	38
FIGURE 11 : SIX TESTS DE CONTRÔLE DE QUALITÉ APPLICABLES À LA PLUPART DES RÉSEAUX D'ÉCHANTILLONNAGE. 41	
FIGURE A 1: VUE DU THERMOGRAPHE ET DU TUBE DE PVC PERFORÉ. LE NUMÉRO DU THERMOGRAPHE EST ÉCRIT SUR LE TUBE. LE THERMOGRAPHE EST ATTACHÉ AU TUBE À L'AIDE D'UN PETIT «TIE-WRAP». LES TROUS DANS LE TUBE PERMETTENT LA CIRCULATION DE L'EAU AUTOUR DU THERMOGRAPHE ET ÉVITER LA SURCHAUFFE DANS LE TUBE. LA COULEUR BLANCHE PERMET DE LIMITER L'ABSORPTION DES RAYONS SOLAIRES. ....	34
FIGURE A 2: TIGE D'ACIER DE 0,6 M DE LONG AVEC UN GILLET SOUDÉ AU BOUT. ....	35
FIGURE A 3: EXEMPLE D'UN MONTAGE D'INSTALLATION SUR BLOC DE BÉTON .....	36
FIGURE A 4: ÉQUIPEMENT NÉCESSAIRE POUR INSTALLER DES THERMOGRAPHES AVEC LA MÉTHODE ÉPOXY A) ÉPOXY FX-764 SÉPARÉ FOX ; B) BOUCHON EN PVC ; C) THERMOGRAPHES ; D) «TIE-WRAP» ; E) RUBAN DE TÉFLON ; F) GANTS DE CAOUTCHOUC ; G) CONTENANT EN PLASTIQUE ; H) BROSSE EN ACIER ; I) ÉTIQUETTE EN MÉTAL. ....	37
<b>FIGURE A 5:</b> THERMOGRAPHE ATTACHÉ DANS UN EMBOUT DE PVC. A) BOUCHON PROTÉGÉANT LE THERMOGRAPHE CONTRE LES RAYONS SOLAIRES ; B) EMBOUT DE PVC ASSEMBLÉ (BASE ET TÊTE) AVEC LE THERMOGRAPHE À L'INTÉRIEUR ET DE L'ÉPOXY AUTOUR DE LA BASE ; C) EMBOUT DE PVC ASSEMBLÉ ET COLLÉ À LA ROCHE AVEC DE L'ÉPOXY ; D) EMBOUT DE PVC SÉPARÉ AVEC LA BASE SEULEMENT COLLÉE À LA ROCHE AVEC DE L'ÉPOXY..	37

# 1 INTRODUCTION

---

## 1.1 Mise en contexte

La thermie des rivières mérite une attention particulière puisqu'elle influence la qualité de l'eau (Coutant, 1999) et a donc un impact sur la stabilité des écosystèmes et la survie des populations de poissons (Elliott *et al.*, 2010). Le suivi de la température de l'eau est important dans plusieurs domaines, notamment le secteur économique relié aux ressources hydriques et la gestion environnementale (Caissie, 2006). Cet intérêt est traduit par une littérature variée, en constante expansion.

La température de l'eau est étroitement corrélée avec la température de l'air. Cette variable est par conséquent sensible aux changements anticipés du climat (Isaak *et al.*, 2012). Les transformations climatiques présentes et à venir font en sorte que des efforts accrus sont requis pour la protection des écosystèmes aquatiques. La conservation d'une ressource passe d'abord par la prise de conscience de l'état de la situation, et donc nécessairement par la récolte de données sur le terrain. Pour que les données soient crédibles et valables, elles doivent être récoltées et analysées avec soin. Comme dans le cas des autres variables de qualité de l'eau, les programmes de surveillance de la température de l'eau incluent les étapes suivantes:

1. une définition des objectifs de suivi thermique et l'identification des informations souhaitées;
2. la conception du réseau de suivi;
3. l'élaboration des protocoles d'échantillonnage;
4. le déploiement d'appareils;
5. le contrôle de la qualité des données;
6. le stockage des données.

L'assurance de la qualité des données est une préoccupation présente à toutes les étapes du processus d'élaboration d'un réseau de suivi: dans les premières étapes de préparation, lors de la récolte même des données et lors de l'inspection de celles-ci. Le rapport qui suit vise une recension détaillée des différentes étapes et subtilités que comporte le processus d'échantillonnage de la température de l'eau en continu. L'établissement d'un réseau d'échantillonnage nécessite l'uniformisation de normes de qualité et de techniques de travail. La standardisation des procédures relatives à chaque étape permettra à long terme d'augmenter leur efficacité en termes de temps et de qualité, mais aussi d'améliorer le partage d'information pour des recherches futures dans ce domaine d'intérêt croissant.

## 2 OBJECTIFS DU SUIVI THERMIQUE

---

La première étape dans la conception d'un réseau de suivi est la définition des objectifs du programme de mesure et de suivi ainsi que des informations attendues (Sanders, 1983). Khalil *et al.* (2009) ont recensé les types d'objectifs généraux usuels pour les réseaux de suivi :

- l'identification de tendances (saisonnière, annuelle, pluriannuelle);
- la surveillance générale (établir une base de données permettant une caractérisation thermique générale);
- l'évaluation de l'atteinte ou de la violation de normes environnementales, comme des dépassements de seuil pour la survie de différentes espèces aquatiques (Beckers *et al.*, 1972) ;
- la surveillance de l'effet d'une source de pollution connue, comme le panache d'un effluent thermique.

Les objectifs influenceront la configuration du réseau à établir. Ils déterminent aussi le niveau de précision recherché.

## 3 CONCEPTION DU RÉSEAU DE SUIVI

---

Les trois grands paramètres régissant la conception initiale du réseau sont :

- la localisation des stations et leur densité spatiale;
- la durée escomptée du suivi et la fréquence d'échantillonnage;
- le choix des dispositifs de mesure, qui dépend de la précision nécessaire à l'atteinte des objectifs.

Ces trois paramètres doivent bien sûr s'arrimer au budget disponible et aux dépenses allouées aux opérations et aux analyses (Strobl *et al.*, 2008).

### 3.1 Choix et nombre de sites

La distribution spatiale des stations est tributaire des objectifs fixés. Ainsi, le réseau de thermographes ne sera pas le même si des thermographes sont déployés pour évaluer les tendances temporelles de la température à l'échelle du pays comparativement au nombre d'appareils déployés pour caractériser les habitats de saumons dans un bassin versant. Comme le mentionne Daigle *et al.* (2016b), plusieurs considérations logistiques vont devoir être prises en compte dans la sélection de l'emplacement des sites d'échantillonnage, incluant les ressources humaines et budgétaires disponibles. La plupart du temps, on cherche à optimiser la densité du réseau en prenant en compte son contenu en information.

Plusieurs approches de sélection de sites sont décrites par Khalil *et al.* (2009). On parle de l'approche «ordonnée» («stream ordering approach») comme étant l'une des plus utilisées, surtout quand des données antécédentes ne sont pas disponibles. Avec cette méthode, il est possible d'utiliser un ou plusieurs attributs d'un cours d'eau pour déterminer la distribution des sites de mesure comme :

- l'ordre (méthode d'Horton);

- la longueur (km en rivière);
- la superficie drainée;
- le débit.

Lorsque des données existent, on peut évaluer statistiquement le contenu en information d'un réseau plus ou moins dense. Ainsi, une stratégie d'élaboration d'un réseau thermique peut consister en l'établissement préalable d'un réseau temporaire très dense. À partir des séries chronologiques de ce réseau, on peut ensuite tester différentes densités et configurations de réseau en évaluant leur contenu en information. Cette approche peut être envisagée dans le cas de la température de l'eau, étant donné le coût relativement faible de certains thermographes.

Plusieurs approches statistiques permettent d'évaluer le contenu en information d'un réseau de mesure, dont :

- l'entropie (e.g. Alfonso *et al.* 2013; voir Annexe) ;
- les approches de régression (Tirsch *et al.*, 1984);
- les analyses multivariées (Ou *et al.*, 2012; Daigle *et al.*, 2016b) ;
- les approches géostatistiques (Beveridge *et al.*, 2012).

Une revue de littérature de ces différentes approches a été colligée par Khalil *et al.* (2009). Ces auteurs mentionnent notamment qu'une bonne sélection de sites doit se baser sur les caractéristiques physiques du bassin (région climatique, l'utilisation du sol, la présence d'une source de pollution, etc.).

## 3.2 Choix du dispositif<sup>1</sup>

Il existe plusieurs types de dispositifs pour mesurer la température : thermomètre manuel, thermographes mécaniques, thermistors, etc. (Quilty *et al.* 2007; Sanders, 1983). Les stations peuvent être munies de thermographes autonomes avec une mémoire interne, ou une station « fixe » peut être construite avec une sonde reliée à un terminal sur la rive. Dans ce cas, la sonde n'a pas de mémoire. Les données sont stockées dans le terminal en rive, qui contient habituellement un capteur de données («datalogger») et une batterie (souvent chargée par un panneau solaire). Cependant, il existe aussi maintenant de petits dispositifs résistants, faciles à transporter, d'une précision considérable et peu dispendieux (Isaak *et al.*, 2013). La section 3.2.1 traite des éléments à considérer lors de la sélection de ceux-ci, et la section 3.2.2 fait une parenthèse sur l'intérêt de la technologie satellite et «Bluetooth» qui permettent le téléchargement des données à distance.

### 3.2.1 Thermographes sans fil

Pour la sélection d'un dispositif sans fil contenant une mémoire interne, Stamp *et al.* (2014) relèvent certains éléments à considérer :

- durabilité ;
- précision ;
- résolution ;
- intervalle de température mesurée ;
- mémoire ;
- pile (remplaçable ou non) ;
- option de programmation.

---

<sup>1</sup> Les informations colligées dans cette section proviennent de documents produits principalement aux États-Unis, visant à uniformiser les techniques d'échantillonnage de l'eau en continu dans les ruisseaux et les rivières (Dunham, Chandler *et al.* 2005, Wagner, Boulger Jr *et al.* 2006, Mauger 2008, Ward, Hallock *et al.* 2010, Stamp, Hamilton *et al.* 2014, Mauger, Shaftel *et al.* 2015 et MDNR, sans date).

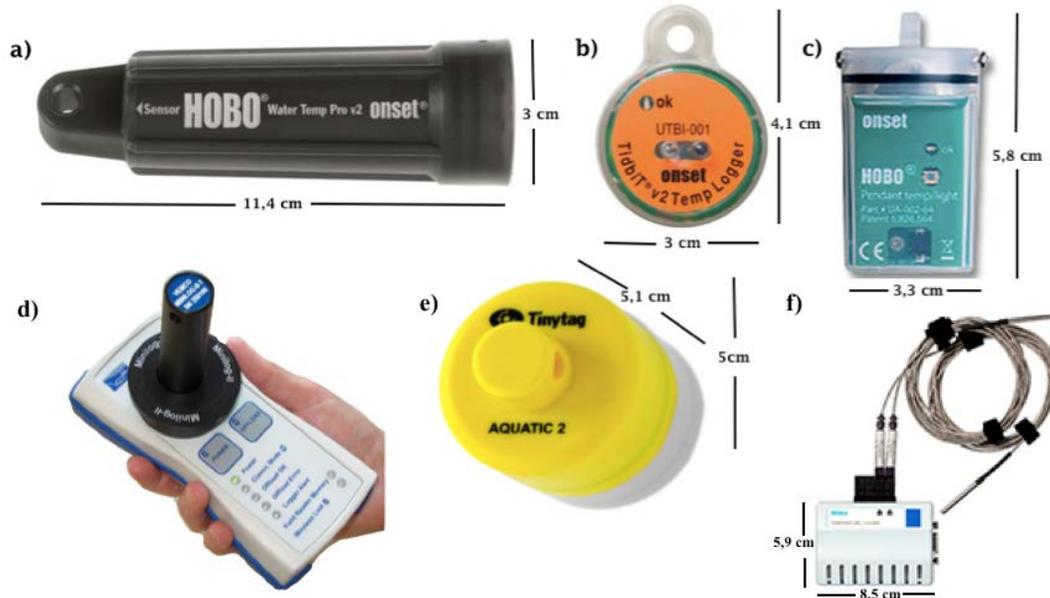
La précision réfère à l'écart entre la température donnée par le thermographe et une température de référence. Dans la documentation consultée, les auteurs suggèrent une précision minimale de  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$  pour les thermographes (MDNR, sans date; Mauger, 2008; Wagner *et al.*, 2006 ; Ward, 2011) d'autres acceptent une marge allant jusqu'à  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  (Stamp *et al.*, 2014). Encore une fois, la précision visée est tributaire des objectifs. L'évaluation d'une tendance générale ne demande pas autant de précision que l'observation d'évènements ponctuels où une différence de quelques fractions de degrés peut être jugée significative. Il est important de considérer que plus un thermographe est précis, plus il est coûteux. La densité du réseau et le budget sont donc des facteurs décisifs.

La résolution est le changement minimum détecté par le thermographe. La documentation s'entend sur le fait que celle-ci se doit d'être inférieure à la précision.

En général, les intervalles de température acceptés sont compris entre  $-4^{\circ}\text{C}$  et  $37^{\circ}\text{C}$  pour les thermographes destinés à l'échantillonnage de l'eau (Mauger, 2008; Mauger *et al.*, 2015; Stamp *et al.*, 2014; Ward, 2011). Pour mesurer la température de l'air, il est préférable d'opter pour des thermographes ayant un intervalle de  $-40^{\circ}$  à  $85^{\circ}\text{C}$  (Dunham *et al.*, 2005). Un tableau comparatif de plusieurs thermographes, permettant d'avoir un aperçu ce qui se fait sur le marché, a été colligé à partir de ceux produits par Dunham *et al.* (2005) et Stamp *et al.* (2014). Ce tableau est fourni en Annexe 1. La figure 1 permet de visualiser l'apparence de ces thermographes.

La durée de vie de la pile et la taille de la mémoire varient selon la gamme du thermographe et dépendent de la fréquence d'échantillonnage (Mauger 2008). Lors de l'achat, le fournisseur peut fournir une approximation du nombre de mesures pouvant être enregistrées. De nos jours, les thermographes sont généralement conçus avec un minimum de huit kb de mémoire. C'est l'équivalent d'environ 165 jours à une fréquence de mesure correspondant à une par 30 minutes (Dunham *et al.* 2005). Certains thermographes ont une pile d'une durabilité limitée, mais qui est remplaçable. D'autres thermographes ont une durée de vie égale à la durée de vie de leur pile, donc non remplaçable ou remplaçable exclusivement par le fournisseur. Comme il est possible de le constater à l'Annexe 1, leur pile dure entre cinq et dix ans, lorsque les mesures sont prises à une fréquence de une

minute et plus. De plus, ces thermographes sont mieux scellés. Le risque d'infiltration d'eau est donc moindre.



**Figure 1 :** Différents modèles de thermographes sans fil. a) HOBO© U22-001 Water Temp Pro v2 b) HOBO© TidbiT v2 Water Temp c) HOBO© Pendant Temp/light 64 KB d) Minilog II-T Temp e) Tinytag Aquatic 2 (TG-4100) f) Veriteq 1000/1400 series

(Source a), b), c) : Onset Computer Corporation. d) © 2017 Vemco. e) Gemini Data Loggers UK Ltd. f) ©Vaisala 2015 )

Note : Il est avantageux de pouvoir programmer les thermographes. La programmation permet la sélection des éléments-clés de l'échantillonnage. Cette étape est davantage décrite à la section 4.6.

### 3.2.2 Les sondes de température connectées à une station fixe en berge

Tel que mentionné précédemment, il faut noter que les sondes de température n'ayant pas de mémoire interne doivent être connectées à un capteur de données (datalogger) situé à proximité, sur la berge du cours d'eau. La plupart des sondes utilisent le protocole SDI-12 pour la communication et le transfert de données vers le datalogger. Parmi les configurations les plus populaires, on trouve la sonde Aquatemp de Sutron

(<http://www.sutron.com/product/aquatemp-water-soil-temperature-sensor/>), qui a une précision de 0,1°C. Cet appareil nécessite en entrée un voltage entre 7-16 V, avec un courant inférieur à 5 mA, en provenance du datalogger et de sa pile. Un second exemple de configuration est celui offert par Campbell Scientific (<https://www.campbellsci.ca/water-temperature>). Cette compagnie offre une gamme de thermistors pouvant être reliés à leur capteur de données (de type CR1000 ou autre). Leur thermistor de base (107-L) permet de mesurer les températures entre -35°C et 50°C avec une précision de  $\pm 0,2^\circ\text{C}$ . Campbell Scientific offre aussi une chaîne de senseurs de température protégés dans un câble, avec une précision variant entre 0,2 et 0,5°C et pouvant mesurer des températures entre -55 et 85 °C. Bien que les thermistors, qui convertissent une variation de résistance électrique en température, soient les sondes les plus fréquemment utilisées, Campbell Scientific offre aussi un thermocouple (sonde qui mesure la différence de contraction/expansion thermique de deux métaux différents et la convertit en température). Le thermocouple 105T-L offre un plus grand intervalle de mesure de température (-78°C à 100°C) que les thermistors usuels.

### **3.2.3 Les dispositifs satellites et «Bluetooth»**

La modernisation des dispositifs avec l'arrivée des technologies Bluetooth et satellite facilite désormais l'échantillonnage des sites éloignés et difficiles d'accès par la transmission instantanée. Les données se téléchargent à partir d'un ordinateur et/ou d'un téléphone cellulaire à distance (Campbell *et al.*, 2013). Ce genre de système est souvent du type station «fixe» comme illustré à la figure 2. Le système d'acquisition de données est muni d'une antenne et permet le téléchargement à distance.

Ainsi, une vérification récurrente des données acquises peut être faite. Certains systèmes «intelligents» peuvent aviser les utilisateurs lorsque des paramètres sont prédéfinis par le manufacturier ou l'utilisateur. Il est même possible d'appliquer des corrections automatiques (devant être ultérieurement révisées par des experts) par le truchement de logiciels tels AQUARIUS© Time-Series et bien d'autres. La section 6.2 réfère à un webinaire expliquant les options de suivi et d'actions à poser lorsque des anomalies sont détectées. Ce genre de système est très efficace à l'ère où les données environnementales sont d'une telle facilité à prélever. Pour plus de détails,

consulter <http://aquaticinformatics.com/products/aquarius-time-series/data-importing-integration/> .



**Figure 2 :** Système d’acquisition de données situé sur la berge, connecté avec une sonde dans le cours d’eau. (Source : Figure fournie par Daniel Caissie)

Récemment, certains manufacturiers ont aussi utilisé la technologie Bluetooth pour permettre de télécharger les données de sondes autonomes à partir de la rive, donc sans avoir à démanteler le dispositif d’ancrage. Ainsi le HOB0® MX2001 de la compagnie Onset est une jauge à niveau et à température de l’eau qui est munie de la technologie « Low energy Bluetooth », ce qui permet le téléchargement des données avec une application sur un téléphone cellulaire ou une tablette à une distance allant jusqu’à 30 m de la sonde (<http://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/mx2001>).

# 4 ÉLABORATION DES PROTOCOLES D'ÉCHANTILLONNAGE

---

## 4.1 Fréquence d'échantillonnage

La fréquence d'échantillonnage dépend des objectifs établis pour le réseau de stations de mesure. Par exemple, si l'échantillonnage vise à évaluer quantitativement les effets d'un évènement rapide et spontané (rejet ponctuel), la fréquence d'échantillonnage a intérêt à être élevée et peut atteindre jusqu'à 20 fois par heure (Wagner *et al.*, 2006). Cependant, à cette fréquence, la mémoire de la majorité des thermographes autonomes se sature rapidement. Ceci est moins critique pour les stations fixes ayant une sonde de température reliée à un capteur de données («datalogger»), ces derniers ayant habituellement beaucoup de mémoire. Plusieurs auteurs ont plutôt suggéré de prendre une mesure aux 15 à 30 minutes (Mauger, 2008; Stamp *et al.*, 2014; Ward, 2011). Dunham *et al.* (2005) ont effectué une expérience qui a révélé qu'en échantillonnant aux 60 minutes, la probabilité de manquer un extrême journalier était inférieure à 2%. Le maximum et le minimum journalier sont importants pour ne pas avoir des moyennes quotidiennes biaisées; s'il manque un ou l'autre, les indicateurs calculés peuvent avoir un biais à la hausse (s'il manque le minimum) ou à la baisse (s'il manque le maximum). Cette fréquence d'échantillonnage semble donc être adéquate pour les suivis à long terme puisque la mémoire des thermographes ne se remplit pas trop rapidement.

Même au pas de temps horaire, l'autocorrélation de la température de l'eau demeure très élevée et les fréquences élevées de mesures produiront une information thermique en partie redondante. Il existe plusieurs méthodes statistiques permettant de déterminer une fréquence optimale d'échantillonnage à partir de séries chronologiques horaires (ou sub-horaires). Ces méthodes incluent :

- Tests paramétriques sur la tendance (Lettenmaier, 1976);

- Utilisation des intervalles de confiance basés sur la moyenne (Sanders et al. 1983);
- Analyse harmonique et de Fourier (Zhou, 1996);
- Régression (Tirsch et Male 1984) ;
- Variogramme (Khalil *et al.*, 2004).

## 4.2 Durée de l'échantillonnage

La durée du déploiement est elle aussi directement reliée aux objectifs du réseau. Les recommandations de Mauger *et al.* (2015) sont à l'effet de mesurer la température à l'année ou aussi longtemps que l'eau circule (pas de gel de la colonne d'eau au complet). Dans ce cas, les thermographes doivent être choisis en conséquence. Un déploiement à longueur d'année demande la planification d'entretiens afin de libérer la mémoire ou changer la pile au besoin. Pour voir une tendance à plus long terme, pour distinguer par exemple un phénomène annuel (e.g. date moyenne du dégel, variabilité. interannuelle, etc.) il faudrait, selon ces mêmes auteurs, recueillir au moins trois années de mesures.

Pour des raisons techniques, quelques auteurs conseillent de restreindre la période d'échantillonnage à la saison estivale (juin à octobre) (Mauger 2008, Ward 2011, Stamp *et al.* 2014). En effet, le déploiement des sondes durant toute l'année nécessite un dispositif d'ancrage à l'épreuve des intempéries associées au mouvement de glace et aux crues printanières importantes.

## 4.3 Réplication

Lors du déploiement, Mauger *et al.* (2015) proposent de placer deux thermographes à chaque site. Un deuxième thermographe est une sorte de garantie de la qualité des données et une sécurité si le dispositif est installé dans une zone à risque de vandalisme, de

piétinement par des marcheurs ou des pêcheurs, ou encore à risque d'évènement de débit intense (crues printanières, déversements d'un barrage, débâcles, etc.).

En plus des thermographes dans l'eau, il peut être intéressant d'avoir un ou des thermographes dans l'air pour mesurer la température de l'air ainsi que la luminosité, selon les objectifs établis pour le réseau. Les données de température de l'air sont entre autres utiles pour la validation des données (voir la section 6.0), mais également pour faire de l'interpolation lorsque des données erronées sont présentes dans les séries de mesures. Les données de température de l'air pourraient aussi aider à compléter une série de mesures thermiques de l'eau manquante, si une bonne relation entre les deux variables a pu être définie (Stefan *et al.*, 1993). Cependant, il faut garder en tête que plus il y a de mesures, plus les coûts relatifs au matériel et à l'analyse de données sont élevés (Strobl *et al.*, 2008).

#### 4.4 Tests de précision pré-déploiement

Plusieurs auteurs s'entendent sur la nécessité de vérifier que les thermographes employés lisent la même température avec une faible marge d'erreur. Le protocole du test de précision décrit ici est une adaptation de (Onset Computer Corporation, 2014) et des protocoles proposés par plusieurs auteurs (Dunham *et al.*, 2005; MDNR, sans date; Mauger, 2008; Stamp *et al.*, 2014; Wagner *et al.*, 2006).

1. Préparer un bain d'eau dans un contenant assez grand (ex. une glacière), mettre le contenant dans une pièce à environ 20 °C, quatre heures avant d'y mettre les thermographes, pour lui donner le temps d'atteindre cette température.
2. Préparer un bain moitié eau, moitié glace dans un contenant assez grand (ex. une glacière) une ou deux heures avant d'y mettre les thermographes, pour lui donner le temps d'atteindre une température d'environ 0°C.
3. Programmer les thermographes en différé à une fréquence d'une mesure par dix minutes pour qu'ils commencent à prendre les mesures une fois qu'ils seront dans le premier bain.

4. Lorsque le premier bain est prêt (après quatre heures), bien mélanger l'eau, insérer les thermographes dans l'eau, noter l'heure.
5. Laisser une heure aux thermographes pour s'adapter, laisser enregistrer trois à cinq mesures et prendre simultanément, le plus près de l'heure d'enregistrement des thermographes, des mesures manuelles avec un thermomètre certifié par l'Institut National des Standards et Technologies (NIST).
6. Répéter les étapes 3 à 5 dans le deuxième bain.

Stamp *et al.* (2014) suggèrent de répéter plusieurs fois le cycle de mesures (étapes 4 à 6).

Les mesures des thermographes sont ensuite lues et la moyenne des mesures sera comparée<sup>2</sup> à la moyenne des mesures du thermomètre NIST et la valeur absolue de la différence devrait être équivalente ou inférieure à la valeur absolue de la précision de l'instrument (donnée par le fournisseur; MDNR, sans date; Mauger, 2008; Wagner *et al.*, 2006 Ward, 2011 ). Si le thermographe échoue le test de précision, il doit être soumis à un deuxième test. S'il échoue de nouveau, ce thermographe ne devrait pas être déployé sur le terrain et devrait plutôt être renvoyé au fournisseur (Schuett-Hames *et al.*, 1999).

Il est conseillé d'élaborer une feuille de calibration des thermographes déployés. Celle-ci rassemblerait les numéros de série des thermographes et la différence moyenne avec le thermomètre NIST. Cela permettra de faire un suivi de la dérive de la précision pendant et après le déploiement. Un exemple de base est fourni en Annexe 2.

## 4.5 Matériel et protocoles d'installation

Afin d'offrir une protection physique aux dispositifs, plusieurs auteurs préconisent l'utilisation d'une coquille de protection dans laquelle sont insérés les thermographes (Isaak

---

<sup>2</sup> La comparaison devrait être faite entre le même nombre de mesures prises avec les thermographes qu'avec le thermomètre manuel.

*et al.*, 2013; Mauger *et al.*, 2015; Stamp *et al.*, 2014). Une des méthodes qui revient souvent dans la documentation est celle du tuyau de PVC blanc perforé, attaché avec des sangles à une tige d'acier en forme de U (optionnel). Alors que la couleur noire offre un meilleur camouflage (Stamp *et al.*, 2014), la couleur blanche permet d'éviter le réchauffement associé à la radiation solaire (Dunham *et al.*, 2005) qui pourrait biaiser la mesure de la température de l'eau ambiante. Les perforations favorisent une bonne circulation de l'eau. La tige de métal en U, en plus d'être plus stable qu'une tige droite, est plus sécuritaire au cas où un humain ou un animal marcherait à proximité. De plus, il est plus facile d'y attacher les instruments. Une tige de métal permet de disposer le thermographe à la hauteur recommandée (voir section 4.1.1) pour éviter l'ensevelissement (Ward, 2011). La méthode d'installation avec la tige de métal est utile lorsque le substrat est plutôt meuble. Cependant, lorsque le lit est de la roche-mère, il est possible d'attacher le tuyau de PVC sur un bloc de béton. Il est préférable d'utiliser cette technique pour des cours d'eau à faible débit, car les blocs peuvent glisser et être emportés par de forts débits. Cette technique n'est donc pas à prioriser pour les déploiements incluant la période des crues printanières et des débâcles. Pour les cas où le débit est important et que le substrat est de la roche-mère, Isaak *et al.* (2013) ont proposé un protocole simple permettant de fixer les dispositifs à l'aide d'un mélange adhésif d'époxy sur de grosses roches ou des structures permanentes (ex. piliers de ponts). Une adaptation du protocole d'installation des thermographes de Daigle *et al.* (2016a) et les informations pour consulter le protocole de Isaak *et al.* (2013) sont disponibles en Annexe 3.

Les sondes thermiques reliées à une station fixe terrestre ont la particularité d'être souvent munies d'un long fil qui est branché au capteur de données. L'ancrage de la sonde et la protection du fil doivent être effectués de manière à minimiser le risque que la sonde soit arrachée par le mouvement de sédiments ou de glace. Le fil doit être protégé par une gaine métallique ou un tuyau en PVC. Lorsque le substrat est suffisamment meuble, le fil devrait être enfoui dans le lit du cours d'eau et en berge, jusqu'à proximité de la station fixe terrestre. Il doit aussi être protégé des rongeurs si une partie du fil est à l'air libre.

## 4.6 Lancement des thermographes

Avant le déploiement, l'heure et la date de lancement, la fréquence d'échantillonnage, les unités et les autres options sont sélectionnées (ex. la luminosité, la pression). Les paramètres sont choisis en fonction de la capacité de mémoire du thermographe et leur pertinence pour le contrôle de la qualité des données. Il faut considérer que le nombre d'options sélectionnées influence le taux de saturation de la mémoire et peut réduire la durée d'enregistrement. Par exemple, un thermographe HOBO® Pendant Temp/light 64 KB peut stocker environ 52 000 mesures de température, ce qui équivaut à 36 mois à une fréquence de 1/ 30minutes. Si on choisit d'enregistrer aussi la luminosité à la même fréquence, le temps de mesure sera plutôt entre 20 et 21 mois (environ 29 000 mesures de lumière et température)<sup>3</sup>.

Lors du lancement, la durée de vie théorique<sup>4</sup> de la pile doit être vérifiée. Certains thermographes émettent une prédiction sur leur durée de vie en fonction des options choisies. Cette durée est importante puisqu'une visite d'entretien doit être planifiée à l'intérieur de cette échéance pour remplacer le thermographe ou récupérer les données.

Sowder *et al.* (2012) précisent qu'il est important de lancer tous les thermographes à la même heure et la même fréquence pour faciliter l'analyse de données. Ward (2011) recommande de configurer l'ordinateur à l'heure locale et de s'assurer qu'il ne s'ajustera pas au changement d'heure. Synchroniser ensuite l'horloge du thermographe avec l'heure atomique (« atomic clock ») i.e. <http://www.time.gov/>.

Pour procéder à la programmation (et à la lecture de la mémoire) du thermographe, il faut avoir en main un logiciel de lancement compatible avec le dispositif et une interface (parfois appelée navette, ou «shuttle»). Certaines navettes (e.g. HOBO Waterproof Shuttle U-DTW-1) peuvent faire le lancement des thermographes directement dans l'eau, sans être connectées à un ordinateur. Cette option est moins utile lorsque les thermographes sont protégés par une coquille puisque la lecture nécessite le démantèlement du dispositif. Des

---

<sup>3</sup> Informations recueillies en connectant un thermographe HOBO® Pendant Temp/light 64 KB neuf, au logiciel HOBOWare Pro version 3.7.8.

<sup>4</sup> Les batteries des thermographes ont tendance à se décharger plus rapidement en eau froide.

conseils supplémentaires sur la lecture des thermographes sur le terrain sont donnés à la section 5.2.

## 5 DÉPLOIEMENT DES THERMOGRAPHES

---

### 5.1 Déploiement initial

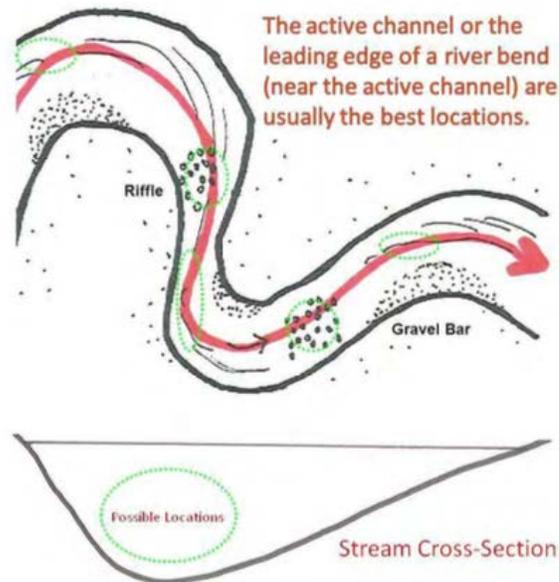
#### 5.1.1 Emplacement des thermographes

Avant les sorties sur le terrain, les conditions hydrologiques doivent être vérifiées (ex. le débit, précipitations reçues dans les dernières 24 heures). C'est d'abord une question de sécurité, mais il est également plus avantageux d'installer les thermographes lorsque les niveaux d'eau sont à leur plus bas. Cela réduit les risques que le thermographe soit éventuellement exondé.

Le thermographe doit être placé dans un endroit représentatif du cours d'eau à échantillonner, c'est-à-dire où l'eau est bien mélangée (non stratifiée). Pour vérifier l'homogénéité thermique dans la section échantillonnée du cours d'eau, il est recommandé de prendre entre cinq et dix mesures le long du transect séparant les deux rives. La mesure peut être prise avec un thermomètre calibré NIST, mais comme c'est un thermomètre en verre et assez dispendieux, il est plus sécuritaire de transporter un thermomètre plus robuste, calibré avec un thermomètre NIST (Schuett-Hames *et al.*, 1999). La moyenne des différences entre les mesures sur le transect (en valeur absolue) devrait être équivalente ou inférieure à la précision du thermomètre utilisé (Mauger *et al.*, 2015).

Jusqu'à une profondeur de 1,2 m, il est possible de considérer qu'il n'y a pas de stratification verticale (Maryland Department of Natural Resources, sans date) Il faut prendre en considération que le thermographe ne devrait jamais être isolé du courant. Il faut ainsi éviter de placer les thermographes dans les fosses et les endroits profonds. En cas de doute, le mélange vertical de l'eau peut être vérifié. Idéalement, le thermographe devrait être placé à environ 0,15 m au-dessus du lit du cours d'eau pour réduire les possibilités d'ensevelissement (Schuett-Hames *et al.*, 1999). Si le niveau est bas lors de l'installation, il faudrait éviter de placer le thermographe à un endroit plus profond que 0,6 m puisque le niveau augmentera au fil des saisons.

Ward (2011) a identifié les endroits dans le cours d'eau où le déploiement est idéal : près de la rive externe en amont d'un méandre ou en aval près de la rive interne, ou encore, au milieu d'un seuil dans les cours d'eau guéables à faible débit. Ces endroits sont représentés par les cercles verts sur la figure 3. Les emplacements sélectionnés doivent être de préférence ombragés.



**Figure 3:** Exemple d'endroits stratégiques où positionner les thermographes dans un cours d'eau selon Ward (2011). (Figure fournie par *Department of Ecology- State of Washington*)

Mauger (2008) statue qu'il est préférable de placer un thermographe le plus en aval possible lorsqu'on soupçonne l'existence d'une source diffuse de pollution thermique. Un autre thermographe devrait être placé à un endroit soupçonné d'être affecté par cette pollution diffuse. Si les causes de l'impact sur la température sont connues et ponctuelles (ex. écoulement d'un tributaire dans le cours d'eau échantillonné), il faut placer un thermographe en amont et en aval du point d'impact.

Daigle *et al.* (2016a) conseillent de placer le thermographe dans le courant et d'éviter les fosses et les zones de contrecourant. Afin d'offrir une protection au thermographe, il est conseillé de le placer en aval d'un bloc rocheux de bonne dimension («boulders»), mais

dans le courant, en évitant la zone de recirculation formée derrière le bloc. Cette zone est favorable à l'accumulation des sédiments, lesquels pourraient ensevelir le thermographe.

Pour ce qui est des thermographes aériens mesurant la température de l'air, ils doivent être placés dans un écran ou une coquille qui les protégera des radiations solaires directes. Cette coquille peut être la même que les thermographes dans l'eau (en PVC troué blanc). Les instruments doivent être préférentiellement positionnés entre 1 à 3 m de la rive (Schuett-Hames *et al.*, 1999) et entre 1,2 à 2,4 m du sol (Dunham *et al.*, 2005), dans une zone ombragée.

Certains protocoles utilisent un même thermographe pour un secteur comprenant plusieurs sites de thermographes submergés. Ou encore, ils utilisent la température de l'air obtenue à partir des mesures faites à la station météorologique la plus proche. Cependant, ces mesures ne sont pas nécessairement représentatives des conditions au-dessus du cours d'eau (Benyahya *et al.*, 2010).

Que les dispositifs soient dans l'eau ou dans l'air, il est conseillé de les camoufler le plus possible pour éviter le vandalisme et de prendre des notes de terrain complètes et claires pour en faciliter la récupération.

### **5.1.2 Métadonnées**

Sur le terrain, plusieurs éléments seront à noter. Beaucoup d'auteurs conseillent de préparer un document permettant de rassembler toute l'information relative à un même site et aux thermographes qui s'y trouvent. Voici les informations essentielles mentionnées le plus souvent dans la documentation.

- Date et heure de la visite + noms des opérateurs.
- Localisation du cours d'eau :
  - nom du cours d'eau;
  - bassin versant;
  - région;

- point GPS (latitude, longitude, altitude);
- schéma du site;
- numéros des photos.
- Conditions aériennes :
  - couvert forestier;
  - température de l'air/conditions météorologiques;
  - radiation solaire<sup>5</sup>.
- Conditions aquatiques :
  - largeur du cours d'eau (tranche d'eau et largeur plein bord du chenal);
  - type de substrat;
  - couleur de l'eau<sup>5</sup>;
  - débit/vitesse de l'eau<sup>5</sup> (au moment de la visite);
  - Mesure de la température instantanée de l'eau + heure.
- Thermographe :
  - numéro de série + identifiant;
  - heure d'installation;
  - indications claires sur la position du thermographe;
  - profondeur du thermographe/ de l'eau;
  - position latérale du thermographe dans le cours d'eau;
  - point(s) de repère.
- Conditions particulières :
  - Ex. : rejet d'égout/barrages, possibilité de vandalisme/ déplacement.

Les opérateurs devraient remplir le document des métadonnées pour chaque site (voir Annexe 4). Les photos constituent une métadonnée de première importance et devraient toujours accompagner la feuille de notes. Hooper *et al.* (2016) suggèrent de prendre six

---

<sup>5</sup> Certaines métadonnées sont propres à des objectifs spécifiques. Elles peuvent être utiles à l'interprétation, mais ne sont pas essentielles.

photos : vue du thermographe, vue aérienne, vue en amont, en aval, vers les rives gauche<sup>6</sup> et droite<sup>6</sup>. Les numéros de ces photos devraient être notés sur la feuille propre au site.

## 5.2 Entretien durant le déploiement

### 5.2.1 Vérification

Les visites sur le terrain permettent de s'assurer que les dispositifs sont bien en place, qu'ils ne sont pas ensevelis sous les sédiments ou déplacés, qu'il n'y a pas eu de vandalisme et que l'emplacement est toujours adéquat en regard des objectifs. Toute irrégularité doit être notée (ex. déplacement naturel ou anthropique du dispositif, bris, ensevelissement, etc.). Plusieurs auteurs proposent de visiter le site mensuellement. Toutefois, selon la taille du réseau, les ressources disponibles et l'accessibilité du site, il peut être difficile de s'y rendre aussi souvent. Stamp *et al.* (2014) conseillent de faire une première visite d'entretien après le premier mois pour s'assurer du bon fonctionnement du dispositif déployé et ensuite de prévoir une visite annuellement. Mauger (2008) recommande de prévoir une visite supplémentaire après des événements de débit intense comme les crues printanières pour vérifier que les dispositifs sont encore bien en place.

Pour plusieurs modèles de thermographes, il est possible de s'assurer que l'instrument fonctionne toujours en vérifiant que la diode lumineuse clignote. Il se peut qu'il soit nécessaire de nettoyer l'instrument avec un chiffon doux pour faire cette vérification. D'ailleurs, plusieurs auteurs, dont Campbell *et al.* (2013) rappellent qu'une des principales causes de la dérive des mesures prises par les thermographes est la croissance d'algues et de biofilm sur les dispositifs. Ceux-ci devraient donc être nettoyés à chaque visite.

Dans les cas où les thermographes sont introuvables ou semblent ne plus fonctionner, un nouveau thermographe doit être installé (il faut donc prévoir des instruments supplémentaires). Dans de tels cas, il faut se référer aux procédures d'installation décrites

---

<sup>6</sup> Pour déterminer la rive gauche et la rive droite, il faut regarder vers l'aval du cours d'eau.

dans la section 5.1. Il serait important de considérer changer d'endroit si le thermographe a été délogé ou s'il a été volé, car ce sont des situations qui pourraient se reproduire si l'instrument est soumis à des vitesses d'écoulement élevées ou susceptible d'être vandalisé. Si tout semble normal, il faut s'assurer que la température de l'eau est toujours homogène en prenant plusieurs mesures consécutives de température le long du transect. S'il est bien mélangé, reprendre une mesure, près du dispositif, synchronisée avec l'heure d'enregistrement du thermographe et la noter sur la feuille de métadonnées (Stamp *et al.*, 2014). La mesure peut être prise avec le thermomètre calibré (avec un thermomètre NIST).

### **5.2.2 Téléchargement des données et changement de pile**

Si le thermographe est déployé pour une longue période de temps, il faut planifier une visite de terrain pour télécharger les données et vérifier le voltage de la pile. Dans le cas des modèles de thermographes de HOBO®, les données peuvent être lues avec un ordinateur de terrain. Si les données sont uniquement enregistrées sur la navette, il est impossible de savoir si les données ont bien été récoltées, si les thermographes ont été exondés ou si le voltage de la pile est suffisant jusqu'à la prochaine visite. D'ailleurs, la navette seule ne permet pas de libérer la mémoire interne des instruments. Les thermographes peuvent aussi être retirés et remplacés par de nouveaux. Les données sont alors téléchargées au laboratoire.

### **5.2.3 Métadonnées**

Lors des visites sur le terrain, il est impératif d'avoir un cartable avec les copies<sup>7</sup> des feuilles de métadonnées de la première visite afin de pouvoir prendre des notes complémentaires et faire un suivi. Toutes les actions posées, les anomalies observées ou informations pertinentes en lien avec les thermographes devraient être notées. Ces informations sont précieuses pour l'interprétation des données (Ward *et al.*, 1986). Un exemple de feuille de métadonnée pour le suivi et les entretiens se trouve en Annexe 5.

---

<sup>7</sup> Des copies de feuilles de métadonnées originales peuvent être faites pour apporter sur le terrain afin de garder les originaux en sécurité. Les informations complémentaires notées peuvent être transcrites de retour au laboratoire. Les données devraient être informatisées au fur et à mesure.

## 5.3 Récupération du thermographe et des données

### 5.3.1 Métadonnées

Lors de la récupération des thermographes, il est impératif d'avoir le cartable avec les copies des feuilles de métadonnées initiales afin de pouvoir prendre des notes complémentaires et faire un suivi. Les éléments à noter sont sensiblement les mêmes que lors des suivis durant le déploiement (consulter les Annexes 4 et 5). Il est important de bien noter l'heure à laquelle les thermographes sont sortis de l'eau.

### 5.3.2 Lectures des thermographes

De retour au laboratoire, cette étape doit se faire dès que possible pour éviter l'épuisement de la pile (Ward *et al.*, 2010), surtout dans le cas de sondes avec des piles non remplaçables ou uniquement remplaçables par le fabricant. Les données brutes doivent être sauvegardées intactes à au moins à deux endroits différents (Wagner *et al.*, 2006).

### 5.3.3 Tests de précision

De retour au laboratoire, il est fortement suggéré de refaire le test de précision (Mauger *et al.*, 2015; Quilty, 2007; Stamp *et al.*, 2014; Wagner *et al.*, 2006; Ward, 2011). Le test devrait être fait après avoir téléchargé les données, puisqu'une reprogrammation ou un relancement du thermographe effacerait sa mémoire. Le protocole est le même que celui décrit dans la section 4.4. S'il y a un constat de dérive, c'est-à-dire que la différence entre la moyenne des mesures du thermographe et la moyenne des mesures prises avec un thermomètre calibré NIST est différente de celle avant le déploiement, il faudra appliquer un facteur de correction (voir la section 6.0). Lorsque les thermographes restent sur le terrain, la dérive est vérifiée avec les mesures de température instantanée prises lors des

visites d'entretien. De là l'importance de prendre la mesure de le plus près de l'heure d'enregistrement du thermographe et de noter cette heure.

#### **5.3.4 Nettoyage des thermographes**

Il est important de bien nettoyer le matériel qui a été déployé sur le terrain; le fournisseur procure habituellement un protocole de nettoyage. Cela permet entre autres de limiter les risques de transfert de plantes invasives dans l'éventualité où les instruments seraient déployés dans une rivière autre que celle du déploiement précédent. Si aucun protocole n'est fourni, il est possible de référer à Ward *et al.* (2010).

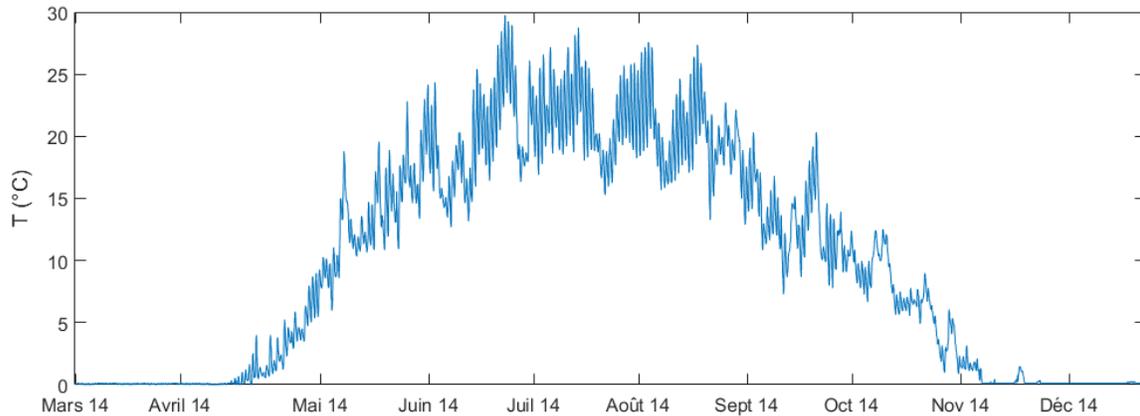
## 6 CONTRÔLE DE QUALITÉ DES DONNÉES RÉCOLTÉES

---

Cette étape consiste à éliminer toutes les données issues d'évènements ponctuels qui ne représentent pas la température de l'eau. On pense notamment à un thermographe exondé, ou enseveli. Plusieurs méthodes permettent de détecter des anomalies.

L'inspection et le nettoyage des données devraient se faire sur une copie des données originales. Certains logiciels de transmission de données en temps réel (e.g. Aquarius©) conservent les données originales et les versions modifiées, en gardant les traces pertinentes (par qui a été effectuée la modification, quand et pourquoi). Cette section traitera donc d'une part du contrôle de qualité qui peut être fait dans une base de données et d'autre part sur des données transmises en temps réel (ou presque).

Avant tout il faut comprendre comment la température de l'eau évolue de façon journalière et de façon saisonnière. La température de l'eau est influencée en grande partie par la radiation solaire et la température de l'air ambiant. Quotidiennement, la température de l'eau suit une oscillation qui devrait évoluer graduellement au cours des saisons (Toohey *et al.* (2014)). Durant l'été, l'oscillation journalière de la température s'amplifie et c'est durant cette saison que les maximums annuels sont atteints. Durant l'hiver, lorsque le thermographe reste dans l'eau, la température enregistrée reste autour de 0°C. Durant l'automne et le printemps, quand l'eau est libre de glace, les oscillations sont faibles et la température moyenne journalière augmentent ou diminuent graduellement, selon la prochaine saison. Sur la figure 4, il est possible de voir les variations journalières et la variation saisonnière qui survient lorsque le mercure monte durant la saison estivale.



**Figure 4 :** Exemple des variations diurne et saisonnière de la température de l’eau prise par un thermographe fonctionnant normalement, installé dans la rivière Ouelle près de La Pocatière, région du Bas-Saint-Laurent, Québec, de mars à décembre 2014.

## 6.1 Bases de données

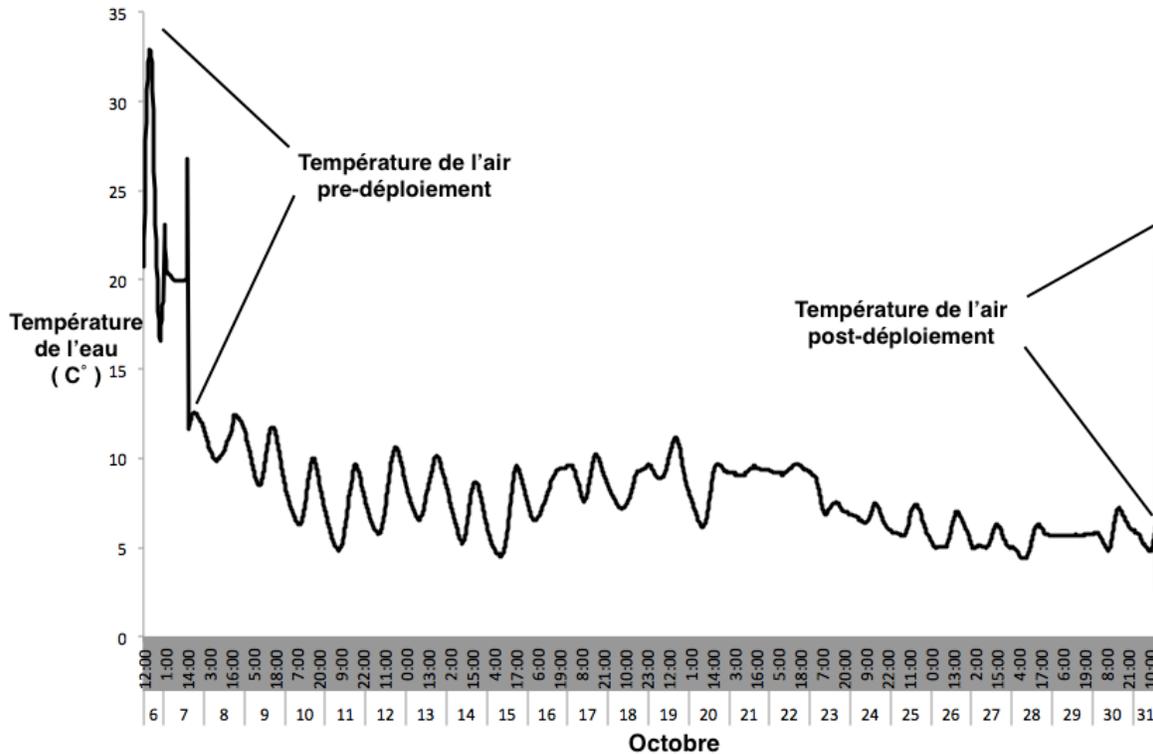
### 6.1.1 Inspection visuelle avec une série de données unique

Les sources principales de cette section sont les articles de Sowder *et al.* (2012) et de Toohey *et al.* (2014).

Pour repérer les données erronées ou non représentatives de la température de l’eau, il est plus facile de les inspecter lorsqu’elles sont tracées sur un graphique chronologique. Visualiser graphiquement les données permet de détecter des patrons de variations douteux. Ceux-ci peuvent être dus à une exondation, un ensevelissement ou encore à une condition de glace. Si aucune note de terrain ne peut prouver un tel évènement, d’autres moyens peuvent être pris pour le confirmer et sont discutés dans la section 6.1.2.

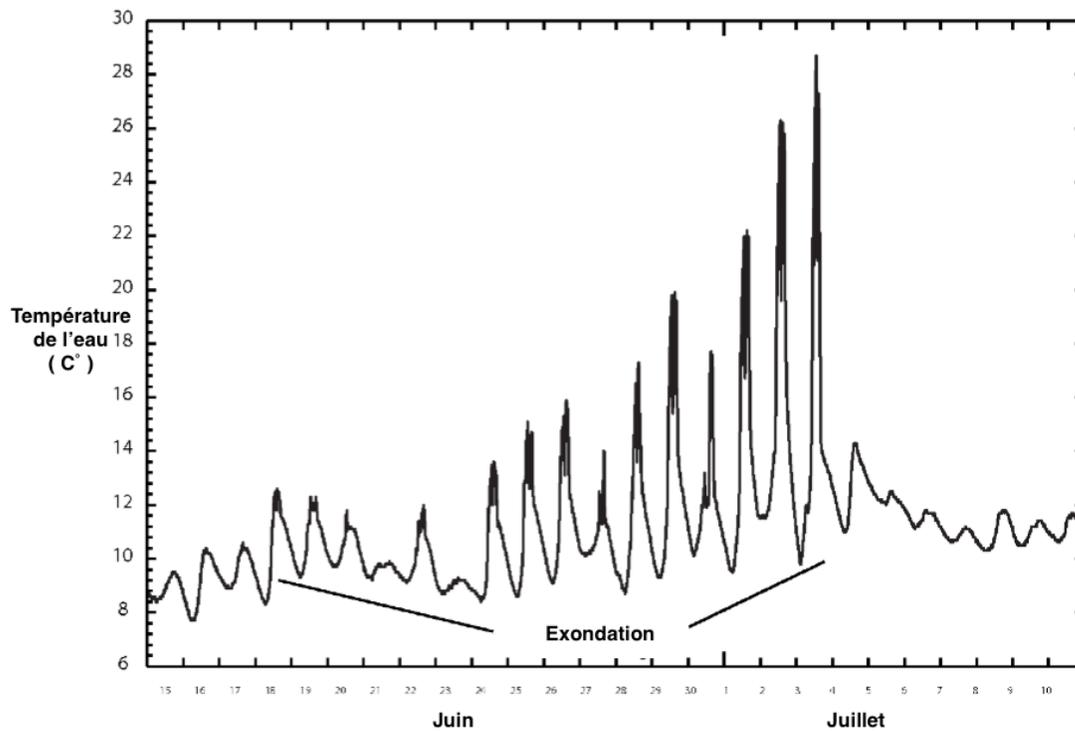
Les utilisateurs devraient commencer par éliminer les données de température enregistrées quand le thermographe était assurément dans l’air, soit pour les périodes d’enregistrement avant et après le déploiement. De même durant la période de déploiement il faut éliminer les données prises lorsque les thermographes sont hors de l’eau pour télécharger les données, par exemple. Pour cette étape, il est commode d’avoir en main les métadonnées

recueillies sur le terrain. La figure 5 montre les données qui devraient minimalement être enlevées pour cette série.



**Figure 5 :** Données de température de l'eau d'un ruisseau de premier ordre du bassin versant de la rivière Cap-Rouge en octobre 2016 à Québec, incluant les données de température de l'air pré- et post-déploiement à éliminer

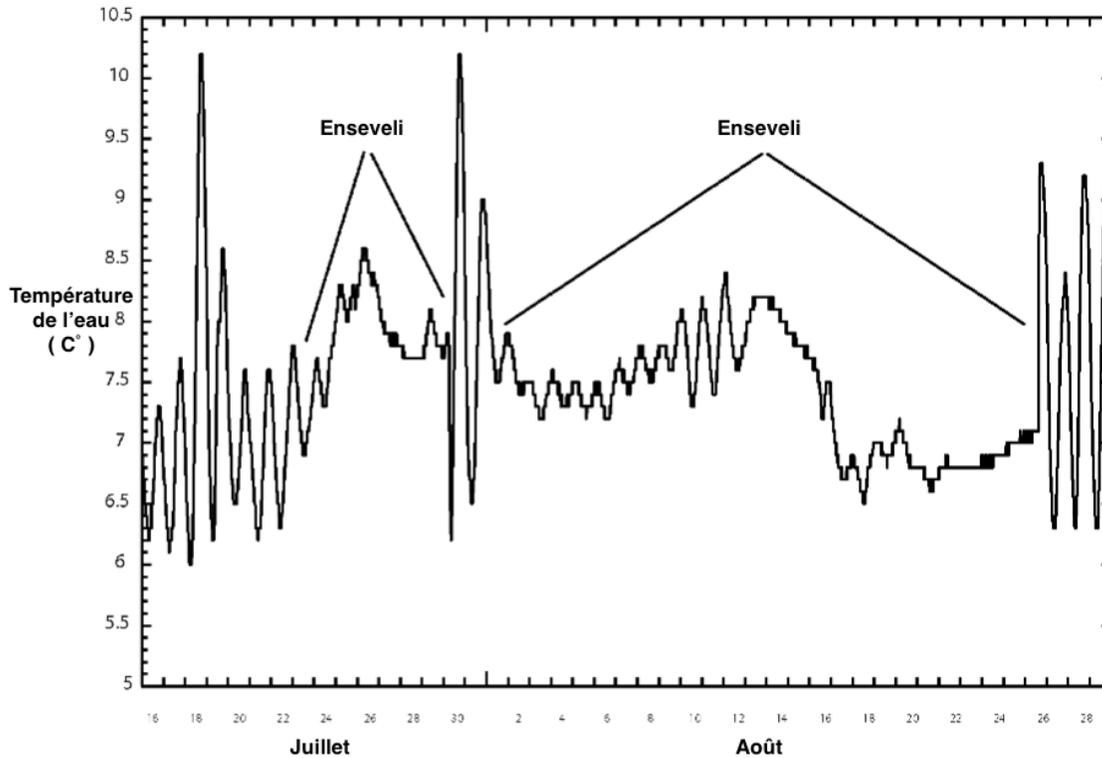
La température de l'eau varie beaucoup moins rapidement que la température de l'air en raison de leur différence de capacité thermique. Ainsi, lorsque la température de l'eau se met soudainement à varier de façon beaucoup plus importante, cela peut être un indice d'exondation. Dans le cas illustré à la figure 6, le thermographe submergé enregistre des variations journalières d'environ 1 à 4°C au mois de juin et juillet 1998. Cependant, pour une période de temps, la variation était entre 6 et 18°C par jour. Ces données ne devraient pas être conservées. Pour éliminer ces données, il faut consulter les notes de terrain ou les comparer avec une autre série de données, comme décrit dans la section 6.1.2. Ceci s'applique pour les cas vus dans cette même section.



**Figure 6 :** Données de température, incluant des données où le thermographe était exondé dans la rivière Kadashan près de Tenakee en Alaska, juin-juillet 1998. (Source : Toohey *et al.* (2014). Figure fournie par *United States Geological Survey*)

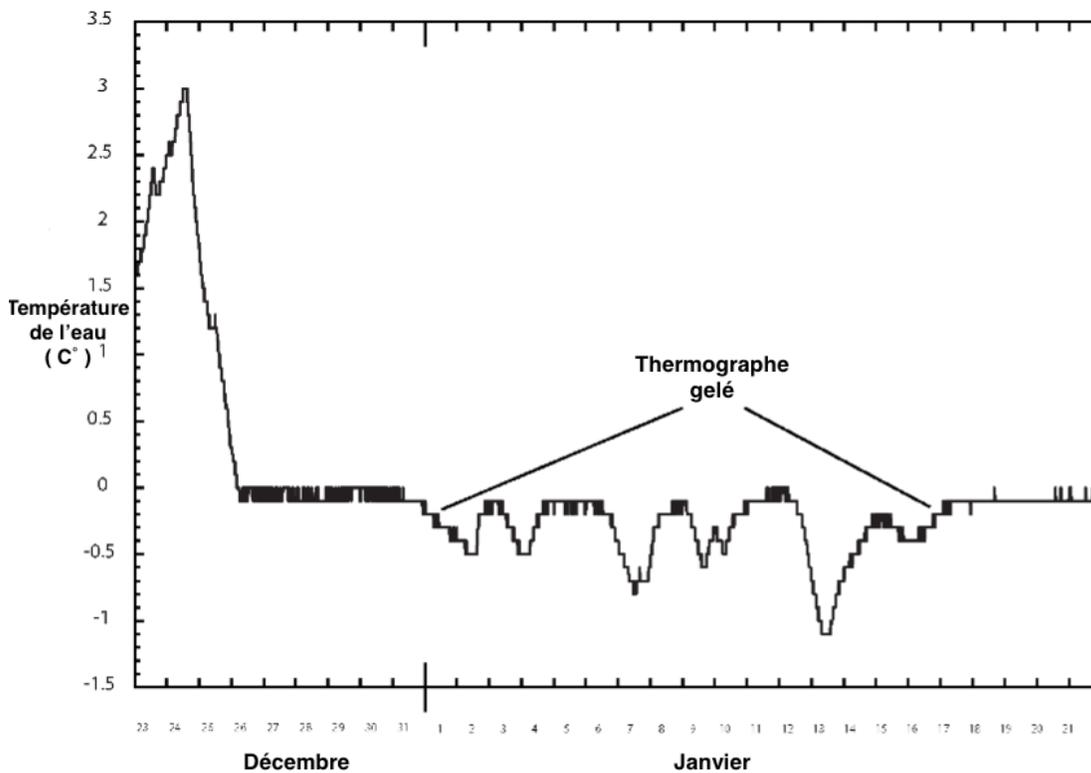
Il faut être prudent avec les changements de variation, car les changements de saisons peuvent porter à confusion. En effet, il est possible de constater à la figure 4 que durant la saison estivale, les oscillations s’amplifient. Il ne faut pas automatiquement considérer que le thermographe a été exondé.

Une température qui varie soudainement de manière moins importante ou encore qui a une faible variabilité diurne ou saisonnière pourrait être un signe d’ensevelissement. Les thermographes très embourbés sont isolés en partie de la colonne d’eau et peuvent être influencés par les résurgences d’eau souterraine et/ou un ruissèlement hyporhéique qui ont une température plus stable que le cours d’eau. À la figure 7, il est possible de voir les données enregistrées par un thermographe qui a été embourbé une première fois, et qui a été recouvert de substrat de nouveau, trois jours après avoir été libéré.



**Figure 7 :** Données de température montrant un ensevelissement répétitif d'un thermographe dans la rivière Unuk près de Wrangell, Alaska, juillet-août 2003. (Source : Toohey *et al.* (2014). Figure fournie par *United States Geological Survey*)

L'hiver, il arrive que les thermographes puissent être recouverts de glace ou exondés en raison d'une réduction du débit. Lorsque le thermographe est en contact avec l'air ou lorsqu'il est enrobé dans une fine couche de glace, la température descend sous zéro (-0,5 à -1,0°C). Un thermographe qui reste submergé mesure plutôt des températures d'environ 0°C (figure 8).



**Figure 8 :** Données de température de l’eau incluant des données erronées d’un thermographe enrobé dans une couche de glace dans le ruisseau Upper Earl West prêt de Wrangell en Alaska, décembre 2004 à janvier 2005. (Source : Toohey *et al.* (2014). Figure fournie par *United States Geological Survey*)

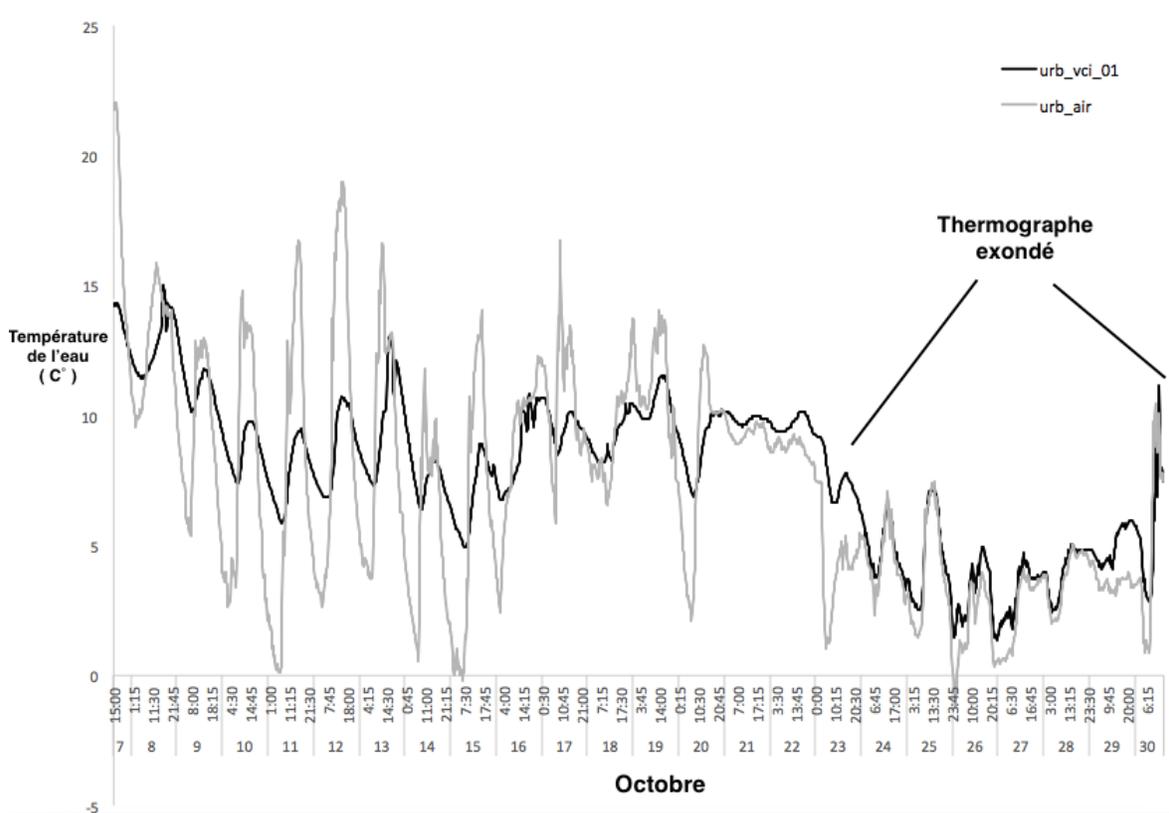
### 6.1.2 Comparaisons avec diverses séries de données

Toohey *et al.* (2014) soulignent que certains patrons de variations douteux peuvent souvent être expliqués par les conditions météorologiques. Campbell *et al.* (2013) ajoutent que les comparaisons avec un ou des répliqués permettent de déceler des évènements subtils, parfois indétectables avec une seule série de données. On pense par exemple à la dérive d’un appareil ou encore à un ruissellement thermique plus ou moins influent. Il est donc intéressant de synchroniser la série chronologique de températures avec d’autres séries de données provenant de sites rapprochés. Plusieurs exemples sont donnés dans les lignes qui suivent.

Une manière efficace de détecter une exondation est de tracer la température de l'air sur le même graphique que la température de l'eau. Une adéquation des courbes de températures est un indice stratégique pour prouver qu'un thermographe a été exondé. Sur la figure 9, il est possible de constater qu'à partir du 23 octobre, la température de l'eau et la température de l'air se chevauchent, ce qui suggère une exondation. En effet, le thermographe a été retrouvé sur la berge le 31 octobre 2016.

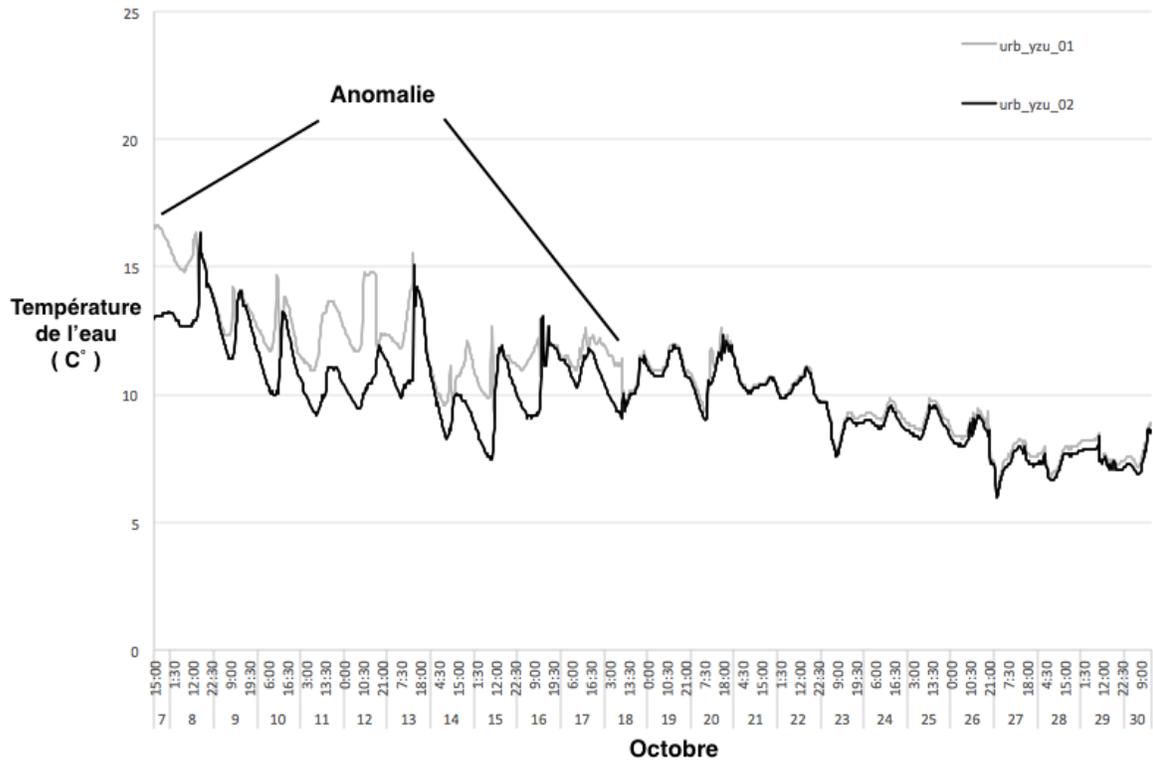
Il est aussi possible de comparer des thermographes provenant de sites situés à proximité. Généralement, lorsque les sites sont rapprochés, les températures enregistrées sont corrélées. Ceci est d'autant plus vrai si les thermographes sont dans la même rivière. Un thermographe enregistrant des valeurs qui varient différemment des valeurs de l'autre thermographe peut être un signe qu'il y a eu une anomalie ou un évènement irrégulier sur un des sites (ex. exondation, rejet ponctuel d'eau avec une température différente de celle du cours d'eau récepteur, faible débit/niveau, etc.). À la figure 10, les températures de deux répliquats ont été tracées sur le même graphique. Il est possible de constater qu'un des thermographes enregistre des températures plus chaudes que l'autre, jusqu'à un certain moment. En traçant les températures sur des graphiques différents, cette anomalie ne peut être facilement détectée. Les données de précipitations dans cette région pour la même période de temps évoquent qu'à partir du 18 octobre, le ruisseau est devenu plus homogène en raison d'une succession d'averses intenses. Avant ces évènements, le faible débit permettait de cibler un possible rejet plus chaud.

Cela met en exergue le fait que si un doute subsiste à savoir si un thermographe a été exondé, les données peuvent être tracées sur le même graphique que les données de débit, ou encore, analysées en parallèle avec les données de précipitations d'une station météorologique à proximité. Une exondation survient généralement en situation de très faible débit (e.g. faible précipitation), ou inversement lorsque le thermographe est délogé par un fort débit et qu'il se retrouve sur la berge.



**Figure 9 :** Données de température de l'eau et de l'air pour le mois d'octobre 2016 sur un site urbain situé sur le bassin versant de la rivière Cap-Rouge, à Québec,. Le chevauchement entre les températures de l'eau et de l'air suggère une exondation.

Une autre option pourrait être de comparer les températures de plusieurs années d'un même site. La corrélation n'est nécessairement pas aussi forte qu'entre deux séries concomitantes, mais les données devraient suivre des patrons saisonniers ressemblants. Une série annuelle qui dérogerait considérablement du patron normal pourrait être considérée suspecte.



**Figure 10 :** Données de température de deux répliques pour le mois d’octobre 2016 dans un ruisseau urbain situé dans le bassin versant la rivière Cap-Rouge, à Québec. L’écart observé entre les températures des dix premiers jours indique une anomalie pour un des deux thermogaphes.

### 6.1.3 Tris automatiques

En plus de l’inspection visuelle, Sowder *et al.* (2012) proposent faire des tris automatiques (« automated checks »). Campbell *et al.* (2013) vantent les avantages de ceux-ci notamment pour le temps qu’ils permettent de sauver lors de l’analyse de données dont le nombre augmente sans cesse, ainsi que pour leur efficacité à détecter des anomalies subtiles. Ces tris se font à partir de logiciels ou d’extensions comme GCE Data Toolbox (pour MATLAB©) ou encore AQUARIUS© Time-Series. Ces logiciels offrent même des corrections intéressantes à appliquer aux données.

Faire un tri ne signifie pas d’éliminer automatiquement des valeurs, mais bien d’étiqueter des données suspectes qui pourraient témoigner d’une anomalie. C’est donc l’opérateur qui

doit juger si une ou des valeurs doivent être retirées. Tout retrait nécessite une justification par des notes de terrain ou par comparaison avec des données de température d'autres sites ou hydroclimatiques. S'il n'y a pas de justification valable, les données devraient être conservées, à moins de l'avis contraire d'un expert (Campbell *et al.* 2013). Sowder *et al.* (2013) incitent à faire ces tris pour vérifier entre autres:

- les mesures qui se situent à l'extérieur d'un intervalle de température défini comme acceptable;
- les valeurs anormales durant une saison;
- les variations de température anormalement rapides (respecte ou non des seuils définis comme acceptables selon le pas de temps);
- les variations anormalement faibles;
- évaluer l'amplitude des écarts de température moyenne d'une journée à une autre (respecte ou non des seuils définis comme acceptables).

Déterminer les valeurs qui guideront les tris automatiques est un exercice qui doit se faire au cas par cas. Les valeurs fixées peuvent être établies à partir de l'historique du cours d'eau ou de la région.

Prenons par exemple une rivière fictive dans une région donnée dans laquelle des données de température de l'eau ont été récoltées pour quelques années. En ciblant les minimums et les maximums pour toutes les années<sup>8</sup>, on peut déterminer l'intervalle de tri par une moyenne de ces valeurs ou tout simplement en choisissant les valeurs extrêmes de ces années. Par exemple, en regard des données antécédentes, Sowder *et al.* (2012) recommandent un intervalle de -1°C à 25°C pour la rivière Sauk dans l'état de Washington (É.-U.).

---

<sup>8</sup> Il faut s'assurer que les données antécédentes ont été contrôlées pour la qualité.

Ce même genre de tri peut être fait pour cibler des variations de température journalières rapides. Un seuil maximal pour une variation anormalement rapide pourrait être défini à 10°C par jour selon Sowder *et al.* (2012) ou à 4°C par heure (1°C pour 15 minutes) selon Anik Daigle (communication personnelle, 2016).

Les ensevelissements importants peuvent être détectés en programmant un tri automatique qui ciblerait des variations quotidiennes minimums. En référence à la figure 7, une variation diurne estivale de moins de 1°C peut suggérer un ensevelissement. Dans un même ordre d'idée, sachant que la température de l'eau en hiver est d'environ 0°C dans les rivières, un tri peut être effectué sur une période restreinte afin de déceler des températures anormalement chaudes pour cette saison (ex. entre 3 et 10°C). Il faut cependant faire attention, car cela pourrait témoigner des influences des apports d'eau souterraine ou autres (ex. égouts pluviaux); dans ce cas, la mesure n'est pas associée à une dérive de l'appareil et pourrait être conservée.

Plusieurs autres anomalies peuvent être détectées par les tris automatiques. Campbell *et al.* (2013) les ont regroupées dans la boîte (figure 11) qui suit, tirée de leur article :

**Date and time.** Each data point has a date and time associated with it. Because streaming sensor networks collect data in chronological order, the date–time pairs should be sequential. When data are collected at fixed intervals (e.g., hourly), it is possible to cross-check the recorded and expected date and time. When sensor data are automatically downloaded to a computer file system, comparing the last recorded date and time with the file system time stamp also provides a check for major datalogger clock errors and sensor failure. To use the time stamp effectively, it is important to know when it was applied (e.g., at the beginning, middle, or end of the sampling interval), and the datalogger clock must be calibrated regularly with a reference.

**Range.** A range check ensures that the data fall within established upper and lower bounds. These bounds can be absolute, based on the characteristics of the sensor or parameter measured (e.g., relative humidity must be between 0% and 100%) or based on historical or expected norms. Long-term data are helpful for setting appropriate bounds, providing information on extreme values (e.g., highest or lowest value ever recorded), statistical norms (e.g., an appropriate number of standard deviations from the mean), and similar metrics based on past observations. When no data exist, bounds may be established using data from nearby locations and refined as more data become available. Customized range tests can account for intra-annual variability, such as cyclical effects that occur over weeks, months, or seasons. For example, the long-term daily bounds used for air temperature measurements are narrower than the range for the entire year (figure 2a).

**Persistence.** When the same value is recorded repeatedly, it may be indicative of a bad sensor or other system failure. For example, wind speed typically changes continually; a constant value over a period of time therefore suggests that a problem has occurred (figure 2b).

**Change in slope.** A check for a change in slope tests whether the rate of change is realistic for the type of data collected. A sharp increase or decrease over a very short time interval (i.e., a spike or step function) may indicate that the sensor was disturbed or has malfunctioned (figure 2c).

**Internal consistency.** Checks for consistency evaluate differences between related parameters, such as ensuring that the minimum air temperature is less than maximum air temperature or that snow water equivalent is less than snow depth (figure 2d). Consistency checks can also determine whether data were collected under unsuitable conditions for a specific sensor. Examples include water temperatures recorded when the sensor was not submerged (i.e., based on corresponding water depth measurements) or when incoming solar radiation was recorded at night (i.e., based on the time of day).

**Spatial consistency.** If no replicate sensors exist, intersite comparisons are useful, whereby data from one location are compared with data from nearby identical sensors (figure 2e). Several different tests for spatial consistency have been employed in streaming sensor network applications, including spatial regression (e.g., Hubbard and You 2005), differences in the statistical distributions of neighboring stations (e.g., Collins et al. 2006), and the Barnes objective analysis (e.g., Fiebrich and Crawford 2001).

**Figure 11 :** Six tests de contrôle de qualité applicables à la plupart des réseaux d'échantillonnage. (Source : Campbell *et al.* (2013). Figure fournie par BioONE)

#### 6.1.4 Corrections

Une fois que les mesures jugées erronées sont enlevées, Schuett-Hames *et al.* (1999) conseillent d'ajuster les mesures de température par la moyenne des différences avec le thermomètre NIST relevées lors des tests de précision faits avant et après le déploiement. Il est possible de valider ces ajustements en comparant avec les mesures prises durant les visites de maintenance. Si on constate, en faisant le test de précision post-déploiement, que la différence entre la mesure du thermographe et la mesure du thermomètre NIST a augmenté de manière importante en comparaison au test pré-déploiement, on dit que le thermographe a dérivé. Si une dérive est suspectée, il est possible d'en faire la correction avec certains algorithmes (Horsburgh *et al.*, 2010).

## 6.2 Mesures acheminées en temps réel (ou presque)

Plusieurs systèmes d'acquisition de données sont munis de capteurs «intelligents» qui détectent des patrons anormaux grâce à des filtres préalablement définis par l'utilisateur. À partir d'un logiciel, des corrections sont appliquées directement sur les données importées qui ont des valeurs physiquement impossibles ou improbables en regard de leur position géographique ou de la saison. Ces corrections sont guidées par des paramètres qui peuvent être déterminés de la même façon qu'à la section 6.1.3.

Toutes les modifications effectuées sont enregistrées et peuvent ultérieurement être modifiées après vérification. On garde aussi trace de qui a fait des modifications, quand et pourquoi. Le site Aquatic Informatics (lien ci-bas) propose un webinaire gratuit dans lequel des experts ciblent sept problèmes souvent rencontrés, et la façon dont le logiciel et les ressources humaines peuvent collaborer pour corriger efficacement les données afin d'en optimiser la qualité, et ce, presque en direct. Ce webinaire traite des données de niveau d'eau, mais plusieurs problèmes rencontrés sont similaires à ceux rencontrés pour la température l'eau. Les experts expliquent que le logiciel agit à deux échelles, la première étant plus globale et corrige des erreurs flagrantes, la deuxième étant plus spécifique en regard de normes définies par les utilisateurs. Les notifications générées par les logiciels surviennent notamment dans les situations suivantes:

- diagnostics internes de base (ex. voltage de la pile en dessous d'un certain seuil);
- violations des paramètres «permanents» (ex. intervalle défini, taux de variation, etc.);
- chevauchement de signaux satellites;
- échec du système.

Les experts décrivent, d'une part, les actions qui seront effectuées par les logiciels (notifications, envoi d'un courriel décrivant la problématique aux utilisateurs, corrections), et d'autre part les actions qui doivent être effectuées par les techniciens.

Cette nouvelle technologie permet de travailler rapidement efficacement, tout en assurant un contrôle de qualité des données optimal et transparent.

Pour plus de détail, consulter le webinaire sur demande à ce site internet : <http://pages.aquaticinformatics.com/web-webinar-wsc.html>

## 7 ENTREPOSAGE DES DONNÉES

---

Comme il a été mentionné plus haut, il est recommandé de toujours garder les copies originales des données à deux endroits différents (une copie sur un disque dur externe ou plusieurs copies dans des dossiers différents, sur un système en réseau de préférence). Un ensemble d'originaux devrait être gardé avec les copies traitées (Sowder *et al.* 2012). Les métadonnées récoltées sur le terrain ainsi que les fichiers contenant les données des tests de précisions et de déploiement des thermographes devraient aussi se retrouver avec les données traitées.

Il faut assurer la pérennité des données, et ce, en dépit des mises à jour de logiciels. Le plus sécuritaire est donc de conserver les documents originaux et traités dans un format standard de type .txt ou .csv (Wagner *et al.* 2006, Mauger *et al.* 2015). Ces formats sont universels et peuvent être exploités par une grande variété de logiciels. Si l'informatisation de l'ensemble des données, incluant les données de terrain, est essentielle pour les analyses subséquentes, la mise en place d'une base de données structurée serait à privilégier afin d'en faciliter l'accès à un large public et de maximiser son utilité.

C'est dans ce contexte que la base de données Rivtemp ([www.rivtemp.ca](http://www.rivtemp.ca)) a été constituée. Instituée il y a trois ans suite à un atelier de partenariat regroupant les représentants de ministères provinciaux et fédéraux, les organismes de conservation du saumon et des chercheurs de l'INRS-ETE et du Canadian Rivers Institute, Rivtemp permet la centralisation des données de température de l'eau récoltées sur les rivières à saumon de l'est du Canada. Sa mise en œuvre a été rendue possible grâce à un réseau de partenaires incluant de nombreux groupes locaux de gestion de bassins versants et de protection de la ressource. En plus de permettre l'archivage de données historiques, Rivtemp coordonne l'expansion du réseau de suivi de la température de l'eau en rivière dans l'est du pays. À ce jour, la base de données inclut 279 stations ayant moins de deux ans de suivi, 220 stations ayant entre deux et dix années de suivi et 52 stations avec plus de dix ans de suivi. La base

de données est actuellement gérée par un groupe de chercheurs à l'INRS-ETE, mais elle devrait éventuellement migrer chez un hôte ayant une plus grande capacité de gestion et une plus grande expérience en gestion de données.

## 8 CONCLUSION

---

Les informations colligées dans ce rapport ont pour but premier de familiariser le lecteur avec plusieurs normes et standards, non exhaustifs, décrits par plusieurs experts pour la mesure en continu de la température dans les cours d'eau. En effet, la documentation dans ce domaine est en constante évolution. L'établissement d'un réseau d'échantillonnage pour cette variable est très précieux et utile pour les domaines de la gestion des ressources aquatiques et la conservation dans un contexte de développement durable. Ainsi, l'utilisation optimale de l'information thermique découle de la minutie, du professionnalisme et de la transparence exercés lors de la collecte, l'inspection et l'entreposage de ces données. L'établissement d'objectifs concrets, la flexibilité et la communication entre les différents utilisateurs sont des atouts indissociables de la réussite d'un réseau. Les configurations peuvent être multiples et peuvent inclure un nombre restreint de stations fixes, qui sont plus coûteuses mais qui ont un risque moindre de perte de données. Ces stations fixes peuvent être complétées par un réseau de thermographes déployés pendant une période de temps suffisamment longue pour établir une fonction de transfert permettant d'estimer la température aux sites secondaires à partir des mesures prises à la station fixe. Ces étapes influenceront le reste des démarches tant au niveau de la précision recherchée que pour le choix des dispositifs et l'établissement du protocole. L'utilisation variée dans le temps et l'espace de ces données nécessite la prise de bonnes métadonnées tant sur le terrain qu'en laboratoire lors des tests de précision des appareils. L'inspection de la qualité des données est incontournable puisque la qualité des multiples analyses découlera des données traitées. Pour finir, un entreposage adéquat est l'étape finale qui assurera une bonne distribution à la communauté scientifique. Il est important de considérer l'établissement d'un réseau flexible qui pourra s'adapter aux technologies à venir.



## 9 RÉFÉRENCES

---

- Alfonso L, He L, Lobrecht A & Price R (2013) Information theory applied to evaluate the discharge monitoring network of the Magdalena River. *Journal of Hydroinformatics* 15(1):211-228.
- Beckers CV, Chamberlain SG & Grimsrud GP (1972) Quantitative methods for preliminary design of water quality surveillance systems.
- Benyahya L, Caissie D, El-Jabi N & Satish MG (2010) Comparison of microclimate vs. remote meteorological data and results applied to a water temperature model (Miramichi River, Canada). *Journal of Hydrology* 380(3):247-259.
- Beveridge D, St-Hilaire A, Ouarda TB, Khalil B, Conly FM, Wassenaar LI & Ritson-Bennett E (2012) A geostatistical approach to optimize water quality monitoring networks in large lakes: application to Lake Winnipeg. *Journal of Great Lakes Research* 38:174-182.
- Caissie D (2006) The thermal regime of rivers: a review. *Freshwater Biology* 51(8):1389-1406.
- Campbell JL, Rustad LE, Porter JH, Taylor JR, Dereszynski EW, Shanley JB, Gries C, Henshaw DL, Martin ME & Sheldon WM (2013) Quantity is nothing without quality: Automated QA/QC for streaming environmental sensor data. *BioScience* 63(7):574-585.
- Coutant CC (1999) Perspectives on temperature in the Pacific Northwest's fresh waters. (Oak Ridge National Lab., TN (US)).
- Daigle A, Boyer C, St-Hilaire A & Bergeron N (2016a) Protocole d'installation des thermograpges: version préliminaire. (INRS-ETE).
- Daigle A, Caudron A, Vigier L & Pella H (2016b) Optimization methodology for a river temperature monitoring network for the characterization of fish thermal habitat. *Hydrological Sciences Journal* :1-15.
- Dunham J, Chandler G, Rieman B & Martin D (2005) Measuring stream temperature with digital data loggers: a user's guide. *General technical report. U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station* (150):15.
- Elliott J & Elliott J (2010) Temperature requirements of Atlantic salmon *Salmo salar*, brown trout *Salmo trutta* and Arctic charr *Salvelinus alpinus*: predicting the effects of climate change. *Journal of fish biology* 77(8):1793-1817.
- Hooper L & Hubbart JA (2016) A Rapid Physical Habitat Assessment of Wadeable Streams for Mixed-Land-Use Watersheds. *Hydrology* 3(4):37.
- Horsburgh JS, Jones AS, Stevens DK, Tarboton DG & Mesner NO (2010) A sensor network for high frequency estimation of water quality constituent fluxes using surrogates. *Environmental Modelling & Software* 25(9):1031-1044.
- Isaak D, Wollrab S, Horan D & Chandler G (2012) Climate change effects on stream and river temperatures across the northwest US from 1980–2009 and implications for salmonid fishes. *Climatic Change* 113(2):499-524.
- Isaak DJ, Horan DL & Wollrab SP (2013) A simple protocol using underwater epoxy to install annual temperature monitoring sites in rivers and streams.
- Khalil B, Abdel-Gawad S, Abdel-Rashid A & Morsy A (2004) Sampling frequency assessment for the drainage water quality monitoring in Egypt. *Proceedings, The International IWA Conference, AutMoNet*. p 19-20.

- Khalil B & Ouarda T (2009) Statistical approaches used to assess and redesign surface water-quality-monitoring networks. *Journal of Environmental Monitoring* 11(11):1915-1929.
- Lettenmaier DP (1976) Detection of trends in water quality data from records with dependent observations. *Water Resources Research* 12(5):1037-1046.
- Maryland Department of Natural Resources MDNR (sans date) Quality Assurance Document For Temperature Monitoring. Maryland, États-Unis).
- Mauger S (2008) Water temperature data logger protocol for Cook Inlet salmon streams. *Cook Inletkeeper, Homer, Alaska*.
- Mauger S, Shaftel R, Trammell EJ, Geist M & Bogan D (2015) Stream temperature data collection standards for Alaska: Minimum standards to generate data useful for regional-scale analyses. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 4, Part B:431-438.
- Onset Computer Corporation (2014) A quick temp-accuracy check (ice bath).
- Ou C, St-Hilaire A, Ouarda TB, Conly FM, Armstrong N, Khalil B & Proulx-McInnis S (2012) Coupling geostatistical approaches with PCA and fuzzy optimal model (FOM) for the integrated assessment of sampling locations of water quality monitoring networks (WQMNs). *Journal of Environmental Monitoring* 14(12):3118-3128.
- Quilty E., RD Moore (2007) Measuring Stream Temperature. *Streamline Watershed Management Bulletin* 10(2).
- Sanders TG (1983) *Design of networks for monitoring water quality*. Water Resources Publication, Schuett-Hames D, Pleus A, Rashin E & Matthews J (1999) Method manual for the stream temperature survey. *Timber-Fish-Wildlife TFW-AM9-99-005, Northwest Indian Fisheries Commission, Olympia, WA. Web link: <http://www.nwifc.wa.gov/TFW/documents.asp>*.
- Sowder C & Steel EA (2012) A note on the collection and cleaning of water temperature data. *Water* 4(3):597-606.
- Stamp J, Hamilton A, Craddock M, Parker L, Roy AH, Isaak DJ, Holden Z, Passmore M & Bierwagen BG (2014) Best practices for continuous monitoring of temperature and flow in Wadeable streams.
- Stefan HG & Preud'Homme EB (1993) Stream Temperature Estimation from Air Temperature1. (Wiley Online Library).
- Strobl RO & Robillard PD (2008) Network design for water quality monitoring of surface freshwaters: A review. *Journal of environmental management* 87(4):639-648.
- Tirsch FS & Male JW (1984) River basin water quality monitoring network design: options for reaching water quality goals. in *Proceeding of Twentieth Annual Conference of American Water Resources Associations*, Édité T.M. Schad (AWRA Publications), p 149 - 156.
- Toohey RC, Neal EG & Solin GL (2014) Guidelines for the collection of continuous stream water-temperature data in Alaska. (US Geological Survey).
- Wagner RJ, Boulger Jr RW, Oblinger CJ & Smith BA (2006) Guidelines and standard procedures for continuous water-quality monitors: station operation, record computation, and data reporting.).
- Ward RC, Loftis JC & McBride GB (1986) The “data-rich but information-poor” syndrome in water quality monitoring. *Environmental management* 10(3):291-297.
- Ward W (2011) Standard operating procedures for continuous temperature monitoring of fresh water rivers and streams. *Washington State Department of Ecology* 39.
- Ward W, Hallock D, Seiders K, Parsons J, Coffin C, Newell E & Welch K (2010) Standard Operating Procedures to Minimize the Spread of Invasive Species from Areas of Moderate Concern. *EAP\_SOP071. Attachment A This Attachment contains the checklist used to prepare for temperature logger deployments*.

Zhou Y (1996) Sampling frequency for monitoring the actual state of groundwater systems. *Journal of Hydrology* 180(1-4):301-318.

# ANNEXE 1. CARACTÉRISTIQUES DES THERMOGRAPHES COURAMMENT UTILISÉS EN RIVIÈRE.

Tableau A 1: Comparaison de plusieurs marques et modèles de thermographes submersibles

Manufacturier	Modèle	Intervalle de Température	Précision	Résolution	Pile	Mémoire	Prix approximatif (US)
Onset (onsetcomp.com)	HOBO© U22-001 Water Temp Pro v2	-40° à 70°C dans l'air; jusqu'à 50°C dans l'eau	±0,21°C de 0° à 50°C	0,02°C à 25°C	6 ans; remplaçable par le fournisseur	42 000 mesures	129\$
	HOBO© TidbiT v2 Water Temp	-20° à 70°C dans l'air; jusqu'à 30°C dans l'eau	±0,21°C de 0° à 50°C	0,02°C à 25°C	5 ans; non remplaçable	42 000 mesures	133\$
	HOBO© Pendant Tempe/ Light 64 KB	-20° à 70°C dans l'air; jusqu'à 50°C dans l'Eau	± 0,53°C de 0° à 50°C	0,14°C à 25°C	1 an; remplaçable par l'utilisateur	28 000 mesures (temp. + lumière)	64\$
	Hobo© U20 Water level logger	-20 à 50°C	± 0,44°C	0,1 à 25°C	5 ans; remplaçable par le fournisseur	21 700 mesures (temp. + pression)	500\$

Suite Tableau A 1							
Manufacturier	Modèle	Intervalle de Température	Précision	Résolution	Pile	Mémoire	Prix approximatif (US)
Gemini (geminidataloggers.com)	Tinytag Aquatic 2 (TG-4100)	-40 à 70 °C	Typiquement $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$	0,01°C	1 an avec usage typique; remplaçable par utilisateur	32 000 mesures	170\$
Vaisala (www.vaisala.com)	Veriteq 1000/1400 series	-40 à 85°C	$\pm 0,15^{\circ}\text{C}$ de -25 à 70°C	0,02 à 25°C	10 ans; non remplaçable	48 000 mesures	-
Vemco (vemco.com)	Minilog II-T Temp	-30°C to +80°C	$\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ de -5°C à 35°C	0,01°C	10 ans; remplaçable	1 million de mesures	-

(Source : Modifié de Dunham, *et al.* (2005) ainsi que Stamp *et al.* 2014. Note : Aucun droit d'auteur n'a été demandé pour publication)



# ANNEXE 3. PROTOCOLE D'INSTALLATION DES THERMOGRAPHES<sup>9</sup>.

---

## 1. Fabrication d'une coquille de protection

1.1 Faire couper un tube de PVC blanc ou noir selon les besoins, et le faire trouser en plusieurs endroits.

1.2 Placer le thermographe dans le tube de PVC, assez long et large pour couvrir tout l'instrument (figure A 1). Le tube protégera le thermographe tandis que les trous favoriseront la circulation de l'eau autour du thermographe. Utiliser un ou deux petits colliers serre-câble (« tie-wrap ») pour attacher le thermographe au tube de PVC.



**Figure A 1:** Vue du thermographe et du tube de PVC perforé. Le numéro du thermographe est écrit sur le tube. Le thermographe est attaché au tube à l'aide d'un petit «tie-wrap». Les trous dans le tube permettent la circulation de l'eau autour du thermographe et éviter la surchauffe dans le tube. La couleur blanche permet de limiter l'absorption des rayons solaires.

## 2. Installation sur une tige d'acier

Cette méthode d'installation demande un peu plus de préparation que celle présentée au point 3 ci-dessous, mais devrait être préférée lorsque la granulométrie du lit le permet.

---

<sup>9</sup> Extraits et adaptation du protocole d'installation de thermographe (adapté principalement pour le HOB0© Pendant de Onset) de Daigle *et al.* 2016a.

2.1 Cette installation nécessite une tige d'acier (« rebar ») d'environ 2 pieds de longueur et d'un bon diamètre pour plus de solidité. Idéalement, faire souder un œillet au bout (figure A 2): ceci facilitera grandement l'installation du thermographe (ou de la coquille de protection) sur la tige, augmentera la solidité de son attache et sécurisera l'installation. Une tige d'acier en forme de U est d'autant plus sécuritaire.



**Figure A 2:** Tige d'acier de 0,6 m de long avec un œillet soudé au bout.

2.2 Pour enfoncer la tige dans le lit de la rivière, prévoir une masse ou un cylindre creux avec poignées généralement utilisé pour enfoncer des pieux.

2.3 Enfoncer la tige dans le substrat et laisser dépasser l'œillet 15 cm au-dessus du lit (si le niveau d'eau le permet) ; le tube de PVC contenant le thermographe y sera attaché.

2.4 Attacher solidement le tube de PVC contenant le thermographe à l'œillet de la tige d'acier en utilisant un « tie-wrap », une corde résistante (ex : corde marine) ou un fil électrique gainé. On conseille particulièrement un fil de taille 14/2, qu'on trouve facilement en quincaillerie (image ci-contre). On utilise les deux fils intérieurs gainés (le noir et le blanc). Ces fils sont malléables et résistants.



2.5 Vérifier la solidité du thermographe et de la tige installés. Si le thermographe n'est pas protégé par une grosse roche, utiliser des sédiments grossiers pour créer une divergence d'écoulement immédiatement en amont du thermographe.

2.6 Installer du ruban fluorescent à la tige pour faciliter le repérage du site et de l'instrument lors de la récupération.

### **3. Installation sur bloc de béton**

3.1 Nécessite un bloc de béton (de forme pyramidale, tel que les « deck block » ou « foot shed »).

3.2 Attacher solidement le tube de PVC contenant le thermographe au bloc en utilisant une corde résistante (ex : corde marine) ou un fil électrique gainé (voir point 2.4 ci-haut) comme à la figure A 3.

3.3 Installer du ruban fluorescent pour faciliter le repérage du site et de l'instrument lors de la récupération. Renverser le bloc s'il est possible que le niveau descende suffisamment pour exposer le thermographe.

3.4 Recouvrir partiellement le bloc avec les sédiments du lit afin qu'il ne soit pas trop visible. Éviter cependant de recouvrir le thermographe de sédiment.

Note : l'utilisation de cette technique est plus efficace que lorsque le débit est moyen/faible.



**Figure A 3:** Exemple d'un montage d'installation sur bloc de béton

(Source : Audrey Maheu, INRS-ETE).

#### 4. Installation sur une structure avec de l'époxy <sup>10</sup>

La méthode à l'aide du mélange d'EPOXY nécessite la présence d'une grosse roche, ou encore une structure comme un pont pour y fixer le dispositif. Cela évite d'avoir à transporter du matériel lourd comme les blocs de béton (voir le matériel à la figure A 4). Cette technique permet de replacer toujours le thermographe au même endroit, si l'emplacement est optimal (voir figure A 5).

Voir le protocole complet : [http://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs\\_gtr314.pdf](http://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_gtr314.pdf)

Note : Ce protocole est adapté principalement pour des thermographes de type HOBO© TidbiT, mais le matériel peut être aisément ajusté pour convenir à d'autres types de thermographes.

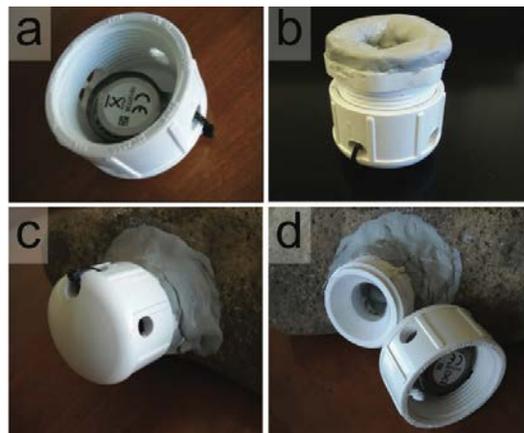
---

<sup>10</sup> Ce protocole est principalement adapté pour les thermographes de type HOBO© TidbiT.



**Figure A 4:** Équipement nécessaire pour installer des thermographes avec la méthode époxy a) époxy FX-764 séparé FOX ; b) bouchon en PVC ; c) thermographes ; d) «tie-wrap» ; e) ruban de téflon ; f) gants de caoutchouc ; g) contenant en plastique ; h) brosse en acier ; i) étiquette en métal.

(Source : Isaak et al, 2013. Figure fournie par *United States Department of Agriculture*)



**Figure A 5:** Thermographe attaché dans un embout de PVC. a) Bouchon protégeant le thermographe contre les rayons solaires ; b) embout de PVC assemblé (base et tête) avec le thermographe à l'intérieur et de l'époxy autour de la base ; c) embout de PVC assemblé et collé à la roche avec de l'époxy ; d) embout de PVC séparé avec la base seulement collée à la roche avec de l'époxy.

(Source : Isaak et al, 2013. Figure fournie par *United States Department of Agriculture*)

# ANNEXE 4 EXEMPLE DE FEUILLE DE MÉTADONNÉES POUR LES PROCÉDURES DE DÉPLOIEMENT

---

## Feuille de métadonnées-déploiement <sup>11</sup>

### Informations sur le cours d'eau

Nom du cours d'eau : \_\_\_\_\_ Identifiant du site : \_\_\_\_\_

Bassin versant/Région : \_\_\_\_\_

Coordonnées GPS : \_\_\_\_\_

Type de couvert : \_\_\_\_\_

Indications vers le site : \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

### Thermographes-EAU

Modèle : \_\_\_\_\_

# de série : \_\_\_\_\_

Vérification du mélange : \_\_\_\_\_

Température instantanée : \_\_\_\_\_

Vitesse du courant : \_\_\_\_\_

Fréquence d'échantillonnage : \_\_\_\_\_

Date du déploiement : \_\_\_\_\_ Récup. : \_\_\_\_\_

Heure du déploiement : \_\_\_\_\_ Récup. : \_\_\_\_\_

Heure de la T° instantanée : \_\_\_\_\_

Méthode de déploiement : \_\_\_\_\_

Profondeur de l'eau : \_\_\_\_\_ (m)

Élévation du thermo.(p/r au lit) : \_\_\_\_\_ (m)

Substrat : \_\_\_\_\_

Largeur du cours d'eau : \_\_\_\_\_ (m)

Largeur jusqu'au thermo. : \_\_\_\_\_ (m)

Commentaires/anormalités/points de repère : \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

### Réplikat

Modèle : \_\_\_\_\_

# de série : \_\_\_\_\_

Vérification du mélange : \_\_\_\_\_

Température instantanée : \_\_\_\_\_

Vitesse du courant : \_\_\_\_\_

Fréquence d'échantillonnage : \_\_\_\_\_

Date du déploiement : \_\_\_\_\_ Récup. : \_\_\_\_\_

Heure du déploiement : \_\_\_\_\_ Récup. : \_\_\_\_\_

Heure de la mesure : \_\_\_\_\_

<sup>11</sup> Inspirée du modèle de Mauger *et al.* (2015).

Méthode de déploiement : \_\_\_\_\_ Substrat : \_\_\_\_\_  
 Profondeur de l'eau : \_\_\_\_\_(m) Largeur du cours d'eau : \_\_\_\_\_(m)  
 Élévation du thermo.(p/r au lit) : \_\_\_\_\_(m) Largeur jusqu'au thermo. : \_\_\_\_\_(m)

Commentaires/anormalités/points de repère : \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

**Thermographe-AIR**

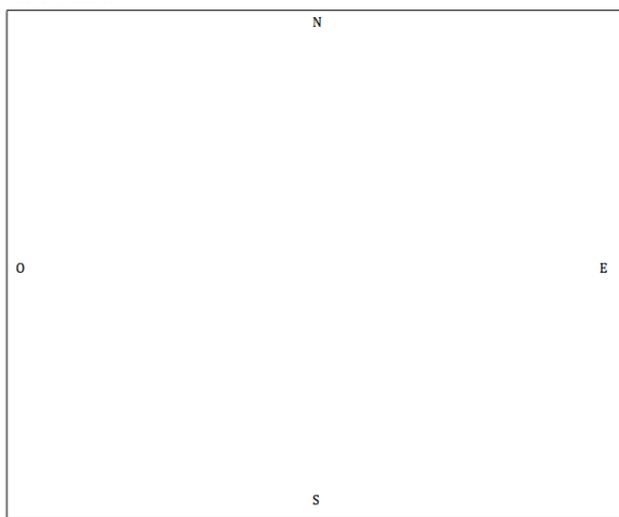
Fréquence

d'échantillonnage : \_\_\_\_\_  
 Modèle : \_\_\_\_\_ Date du déploiement : \_\_\_\_\_ Récup. : \_\_\_\_\_  
 # de série : \_\_\_\_\_ Heure du déploiement : \_\_\_\_\_ Récup. : \_\_\_\_\_  
 Température instantanée : \_\_\_\_\_ Heure de la mesure : \_\_\_\_\_  
 Conditions météorologiques : \_\_\_\_\_  
 Radiation solaire : \_\_\_\_\_  
 Commentaires/anormalités/points de repère : \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

**Photos**

Numéros	Description
_____	ex. :Aval_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____

**Schéma du site**



# ANNEXE 5 : EXEMPLE DE FEUILLE DE MÉTADONNÉES POUR LES PROCÉDURES DE SUIVI ET DE RÉCUPÉRATION

---

Identifiant du site : \_\_\_\_\_ # de série du thermographe<sup>12</sup> : \_\_\_\_\_

Date/hr	Thermo. retrouvé (O/N)	Si Remplacé (# série)*	Site bien mélangé* (O/N)	Thermo. déplacé par opérateurs* (O/N)	Hr. du démontage/ sortie de l'eau	Hr de remise en place	Type d'entretien (RP, N, TD)	T° instant.	Heure de la mesure de T°
<b>Commentaires/anormalités/initiales :</b>									
<b>Commentaires/anormalités/initiales :</b>									
<b>Commentaires/anormalités/initiales :</b>									

---

<sup>12</sup> Prendre les métadonnées dans un tableau unique à chaque thermographe

\*Si le thermographe doit être remplacé ou déplacé en raison d'un vol, de vandalisme, d'un fort débit, d'un substrat trop meuble ou lors d'un simple entretien, il faut noter la raison du déplacement/remplacement, le # série du nouveau thermographe s'il y a lieu, et il faut refaire une nouvelle feuille de déploiement. Si le thermographe reste au même endroit, il doit être réinstallé de la même façon ou noter les différences.

\*\* Remplacer la pile (RP), nettoyage (N), téléchargement des données (TD), etc.

## ANNEXE 6. MATÉRIEL DE TERRAIN

**Tableau A 2 :** Liste du matériel de terrain à prévoir pour l'installation des thermographes et la prise de métadonnées (tableau modifié de Daigle *et al.*, 2016a)

1	Tiges d'acier (« rebars ») avec œillet d'environ 2 pieds de longueur ET/OU blocs de béton ET/OU Matériel pour méthode époxy (voir p. 18 du protocole : <a href="http://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_gtr314.pdf">http://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_gtr314.pdf</a> )
2	Tubes de PVC blanc que vous aurez perforés et coupés en longueurs d'environ 7 à 13 cm selon le type de thermographes.
3	Thermographes préprogrammés
4	Corde résistante (ex. corde marine) ou fil électrique gainé
5	«Tie-wraps» : -petits pour attacher les thermographes dans les tubes de PVC -grands pour attacher le tube à l'œillet de la tige d'acier/bloc/sac
6	Pince coupante pour tailler les fils électriques et les «tie-wraps»
7	Masse (pour enfoncer les tiges dans le lit de la rivière)
8	Ruban fluorescent («flagging tape»)
9	Bottes et/ou cuissardes
10	Cahier ou feuille de terrain permettant de noter les métadonnées
11	Appareil GPS (+pile de remplacement si plusieurs sites sont visités) et boussole
12	Appareil photo
13	Ruban à mesurer ou un lecteur laser qui mesure les distances et un mètre à mesurer
14	Indication et cartes relatives aux sites présélectionnés pour installer les instruments
15	Un thermomètre calibré avec un thermomètre certifié NIST
16	Montre ou appareil électronique synchronisé avec l'heure atomique
17	Feuille de métadonnée, crayon
18	Optionnel (selon objectifs) : Vélomètre, photomètre

# ANNEXE 7. UTILISATION DE L'ENTROPIE POUR ÉVALUER LE CONTENU EN INFORMATION D'UN RÉSEAU

---

Le contexte d'entropie est bien connu en thermodynamique et est souvent décrit comme étant une mesure de la tendance au désordre. Transposé dans un contexte probabiliste, l'entropie  $H(x)$  d'une variable  $x$  a été définie de la manière suivante :

$$H(x) = - \sum_{i=1}^n P[x_i] \log P[x_i]$$

Où  $P[x_i]$  est la probabilité d'occurrence de  $x_i$ . Lorsque l'entropie est nulle, cela signifie que le degré d'incertitude est nul alors que lorsque toutes les valeurs de  $x$  sont équiprobables, alors on a un maximum d'information (ou d'hétérogénéité) dans la série de valeurs.

L'entropie conjointe de deux variables se définit comme :

$$H(X, Y) = -\sum_j \sum_i p[x_i, y_j] \log p[x_i, y_j]$$

On peut aussi calculer une entropie conditionnelle entre deux variables ou deux stations,

$$H(X | Y) = -\sum_j \sum_i p[x_i, y_j] \log p[x_i | y_j]$$

L'information mutuelle, ou la transinformation, peut alors être définie comme :

$$T(X, Y) = H(X) - H(X | Y)$$

C'est une mesure de la redondance entre  $X$  et  $Y$ . Le calcul de la transinformation peut donc être utilisé pour optimiser un réseau. Pour un ensemble de  $N$  sites, on peut choisir un sous-ensemble de  $M$  sites ( $M < N$ ) en calculant la transinformation de toutes les combinaisons de  $M$  sites tirés des  $N$  sites originaux. Le sous-ensemble de  $M$  sites qui maximise la transinformation serait alors sélectionné.