

# Bonnes pratiques pour l'installation et la mise en œuvre de dispositifs de mesure en continu pour la surveillance des milieux aquatiques

N. Guigues, B. Lepot

Septembre 2017

Rapport final

En partenariat avec :



Avec le soutien de





Avec le soutien de

**AGENCE FRANÇAISE  
POUR LA BIODIVERSITÉ**  
MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT



## Contexte de programmation et de réalisation

---

Cette note a été réalisée dans le cadre du programme d'activité AQUAREF pour l'année 2016.

Auteur (s) :

*Nathalie Guigues*  
*LNE*  
[Nathalie.guigues@lne.fr](mailto:Nathalie.guigues@lne.fr)

*Bénédicte Lepot*  
*INERIS*  
[Benedicte.lepot@ineris.fr](mailto:Benedicte.lepot@ineris.fr)

Approbateur :

*Sophie Vaslin-Reimann*  
[Sophie.vaslin-reimann@lne.fr](mailto:Sophie.vaslin-reimann@lne.fr)

---

Vérification du document :

*Matthieu Masson*  
*IRSTEA*  
[matthieu.masson@irstea.fr](mailto:matthieu.masson@irstea.fr)

## Les correspondants

---

AFB : Pierre-François Staub, [pierre-francois.staub@afbiodiversite.fr](mailto:pierre-francois.staub@afbiodiversite.fr)

Etablissement : Sophie Vaslin-Reimann, [sophie.vaslin-reimann@lne.fr](mailto:sophie.vaslin-reimann@lne.fr)

Référence du document : Guigues N., Lepot B. Bonnes pratiques pour l'installation et la mise en œuvre de dispositifs de mesure en continu dans la surveillance des milieux aquatiques. Rapport Aquaref 2017 - 49 pages.

|                                  |                                |
|----------------------------------|--------------------------------|
| <b>Droits d'usage :</b>          | <i>Accès public</i>            |
| <b>Couverture géographique :</b> | <i>National</i>                |
| <b>Niveau géographique :</b>     |                                |
| <b>Niveau de lecture :</b>       | <i>Professionnels, experts</i> |
| <b>Nature de la ressource :</b>  | <i>Document</i>                |

## SOMMAIRE

---

|                                                                               |           |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUCTION.....</b>                                                   | <b>9</b>  |
| <b>2. OBJECTIFS DE LA MESURE ET EXIGENCES SUR LA QUALITE DES DONNEES</b>      | <b>10</b> |
| <b>3. SELECTION DES DISPOSITIFS DE MESURE .....</b>                           | <b>12</b> |
| 3.1 Principes de mesure existants .....                                       | 12        |
| 3.1.1 Sondes électrochimiques .....                                           | 12        |
| 3.1.2 Analyseurs basés sur une réaction chimique, enzymatique ou biologique . | 13        |
| 3.1.3 Systèmes basés sur une mesure optique directe.....                      | 13        |
| 3.2 Méthodologie de sélection d'un dispositif de mesure.....                  | 14        |
| 3.2.1 Collecte des informations et tableau de synthèse .....                  | 15        |
| 3.2.2 Analyse des avantages et inconvénients des différents dispositifs.....  | 17        |
| 3.2.3 Tableau d'aide à la décision et choix final .....                       | 18        |
| <b>4. INSTALLATION.....</b>                                                   | <b>19</b> |
| 4.1 Représentativité de la mesure .....                                       | 19        |
| 4.2 Configuration des stations .....                                          | 20        |
| 4.3 Sélection du site.....                                                    | 23        |
| 4.4 Configuration des mesures .....                                           | 24        |
| 4.4.1 Prétraitement.....                                                      | 24        |
| 4.4.2 Auto-nettoyage .....                                                    | 24        |
| 4.4.3 Fréquence de mesure .....                                               | 25        |
| 4.4.4 Enregistrement des données et récupération des données .....            | 25        |
| <b>5. PRE-VALIDATION EN CONDITIONS REELLES .....</b>                          | <b>25</b> |
| <b>6. MISE EN ŒUVRE OPERATIONNELLE .....</b>                                  | <b>26</b> |
| 6.1 Etalonnage.....                                                           | 27        |
| 6.1.1 Définitions.....                                                        | 27        |
| 6.1.2 Critères d'étalonnage.....                                              | 28        |
| 6.1.3 Procédure de vérification et d'étalonnage .....                         | 28        |
| 6.1.4 Quels étalons utiliser ?.....                                           | 30        |
| 6.1.4.1 Types d'étalon .....                                                  | 30        |
| 6.1.4.2 Nombre et valeurs nominales des étalons .....                         | 31        |
| 6.2 Maintenance.....                                                          | 32        |
| 6.2.1 Procédure générale .....                                                | 32        |
| 6.2.2 Fréquence de maintenance .....                                          | 35        |
| 6.2.3 Récupération des données .....                                          | 36        |
| 6.2.4 Contrôles qualité .....                                                 | 36        |
| 6.2.5 Réactifs et gestion des stocks .....                                    | 37        |
| 6.2.6 Maintenance préventive (instruction fabricant) .....                    | 37        |

|                                                                          |           |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 6.2.7 Problèmes couramment rencontrés .....                              | 37        |
| 6.3 Post-traitement des données .....                                    | 38        |
| 6.3.1 Analyse des données .....                                          | 38        |
| 6.3.2 Correction des dérives.....                                        | 39        |
| 6.3.3 Indice de qualité .....                                            | 43        |
| 6.4 Traçabilité documentaire .....                                       | 44        |
| <b>7. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>                              | <b>45</b> |
| <b>8. ANNEXE I : EXEMPLES DE FICHES POUR LA MAINTENANCE DES CAPTEURS</b> | <b>47</b> |

## Liste des figures et tableaux

|                                                                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1 : Les différentes étapes de la mise en œuvre d'un dispositif de mesure en continu .....                                                           | 10 |
| Figure 2 : Démarche structurée permettant de choisir un dispositif de mesure (d'après Guigues et Cabillic, 2013 ; Bende-Michl et Hairsine, 2010) .....     | 15 |
| Figure 3 : Points à préciser avant l'installation d'un dispositif de mesure en continu.....                                                                | 19 |
| Figure 4 : Plateforme autonome adaptée pour les plans d'eau ou les très grandes rivières (d'après USGS 2006).....                                          | 20 |
| Figure 5 : Station en rivière de type on-line avec crépine de pompage fixe (d'après USGS 2006).....                                                        | 21 |
| Figure 6 : Station en rivière de type on-line avec pompage et mesure dans un bac (d'après GEMCEA, 2009).....                                               | 21 |
| Figure 7 : Station en rivière de type in situ avec les capteurs en position verticale (d'après USGS 2006).....                                             | 21 |
| Figure 8 : Station en rivière de type in situ avec les capteurs en position oblique (d'après Guigues, 2010).....                                           | 22 |
| Figure 9 : Station en rivière de type in situ avec profondeur de mesure ajustable (d'après Guigues, 2010).....                                             | 22 |
| Figure 10 : Points à préciser avant la mise en œuvre opérationnelle d'un dispositif de mesure en continu .....                                             | 27 |
| Figure 11 : Procédure de vérification et étalonnage des capteurs .....                                                                                     | 29 |
| Figure 12 : Avantages et inconvénients des différents types d'étalons (LNM* : Laboratoire National de Métrologie).....                                     | 30 |
| Figure 13 : Vérification et étalonnage à deux solutions étalon (en vert) avec un étalon supplémentaire permettant de valider l'étalonnage (en rouge) ..... | 32 |
| Figure 14 : Principe général d'une procédure type de maintenance .....                                                                                     | 33 |
| Figure 15 : Exemple d'une carte de contrôle pour le pH mesuré dans le milieu avant la maintenance (s : écart type) .....                                   | 36 |
| Figure 16 : Exemple d'artéfact dû à la présence d'un ver d'eau dans la cellule de conductivité .....                                                       | 39 |
| Figure 17 : Exemple de correction de la dérive d'un dispositif de mesure en continu des nitrates sur la période du 4/01/16 au 27/01/16.....                | 40 |
| Figure 18 : Mesures en nitrates, sans et avec correction des dérives (d'après Guigues et al., 2016) .....                                                  | 41 |
| Figure 19 : Mesure de pH, sans et avec correction des dérives (Guigues, 2014) .....                                                                        | 42 |
| Figure 20 : Mesure de la conductivité à 25°C, avant et après correction, d'après (Guigues, 2017).....                                                      | 43 |

|                                                                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 1 : Exemples d'exigences de qualité ou de performances pour les dispositifs de mesure en continu pour différents objectifs de mesure.....                                                   | 12 |
| Tableau 2 : Exemple de considérations techniques et des contraintes associées pour des dispositifs de mesure en continu pour chaque principe de mesure (d'après Bende-Michl et Hairsine, 2010)..... | 18 |
| Tableau 3 : Avantages et inconvénients liés aux configurations on-line ou déportée et in situ .....                                                                                                 | 23 |
| Tableau 4 : Critères d'étalonnage définis par l'USGS pour les paramètres non conservatifs (USGS, 2006).....                                                                                         | 28 |
| Tableau 5 : Exemple de résultats obtenus lors d'une maintenance de capteurs de pH et de conductivité .....                                                                                          | 35 |
| Tableau 6 : Exemple de résultats obtenus lors de la vérification de l'étalonnage pendant une maintenance de capteurs de pH et de conductivité.....                                                  | 35 |
| Tableau 7 : Données utilisées pour corriger de la dérive observée pour un dispositif de mesure en continu des nitrates sur la période du 4/01/16 au 27/01/16 .....                                  | 40 |
| Tableau 8 : Seuils associés à chaque indice de qualité pour les paramètres non conservatifs, d'après USGS 2006.....                                                                                 | 43 |
| Tableau 9 : Synthèse des types de données, des supports et des fréquences des données à enregistrer et stocker – Exemple de l'étude Aquaref (Guigues et al. 2016) .....                             | 44 |

*BONNES PRATIQUES POUR L'INSTALLATION ET LA MISE EN ŒUVRE DE DISPOSITIFS DE MESURE EN CONTINU POUR LA SURVEILLANCE DES MILIEUX AQUATIQUES*

*GUIGUES N., LEPOT B.,*

**RESUME**

La multiplicité des pressions qui pèsent sur les milieux, leur diversité, la variabilité des impacts, l'influence des conditions météorologiques sont autant de paramètres qui renforcent l'intérêt de la mesure en continu dans les milieux aquatiques. En effet, l'analyse en continu permet de suivre des paramètres essentiels au contrôle de la qualité de l'eau avec un pas de temps suffisamment court pour permettre non seulement une étude détaillée de la variabilité temporelle mais aussi une rapidité d'intervention si les données sont transmises en temps réel. Elle présente l'avantage notamment d'acquérir des données représentatives des variations du milieu, par comparaison aux campagnes de prélèvements ponctuels à intervalle fixe qui peuvent passer à côté d'évènements importants comme un pic de concentration lors d'une crue ou lors de pluies après un épandage de pesticides.

Ce document sur les bonnes pratiques pour l'installation et la mise en œuvre de dispositifs de mesure en continu pour la surveillance DCE adresse les différentes étapes qu'il est nécessaire de suivre pour s'assurer de la fiabilité des données acquises dans le temps :

- La description de l'objectif de mesure et sa transcription en exigences de qualité sur les mesures ;
- La sélection de dispositifs de mesure adaptés à l'objectif de mesure, aux contraintes environnementales et intégrant les aspects financiers ;
- L'installation sur site, incluant le type de station et la configuration des mesures ;
- La pré-validation sur site, qui permet non seulement de vérifier que les performances en conditions réelles répondent bien aux exigences de l'objectif de mesure mais aussi d'optimiser le programme de maintenance à mettre en place ;
- La mise en œuvre opérationnelle et les procédures associées (étalonnage, maintenance, post-traitement des données).

**Mots clés** (thématique et géographique) :

Dispositifs de mesure en continu, surveillance DCE, installation, maintenance, étalonnage, post-traitement de données

*GUIDANCE ON INSTALLING AND OPERATING CONTINUOUS MEASURING DEVICES FOR MONITORING*

*GUIGUES N., LEPOT B.*

**ABSTRACTS**

The multiplicity of pressures, their diversity, the variability of their impacts, and the influence of meteorological conditions are factors that reinforce the need for continuous measurement in aquatic environments. Indeed, the continuous measurements make it possible to monitor key water quality parameters with a time frequency sufficiently short to allow not only a detailed study of the temporal variability but also a rapid intervention if the data is transmitted in real time. It has the advantage, in particular, of acquiring data representative of the variations of the environment, compared to the spot sampling campaigns at fixed intervals that may miss important events such as a peak concentration during a flood or during rains occurring just after the application of pesticides.

This good practices guidance for the installation and implementation of continuous measurement devices for monitoring under the Water Framework Directive addresses the various steps that need to be followed to ensure the reliability of data acquired over time:

- Description of the measurement objective and its transcription into quality requirements on the measurements;
- The selection of measurement devices fit for purpose with regards to the measurement objective, environmental constraints and integrating the financial aspects;
- On-site installation, including station type and measurement configuration;
- On-site pre-validation, which not only verifies that performance under real conditions meets the requirements of the measurement objective but also allow to optimises the maintenance program to be implemented;
- Operational implementation and related procedures (calibration, maintenance, post-processing of data).

**Key words** (thematic and geographical area):

Continuous measuring devices, monitoring under the WFD, installation, maintenance, calibration, post-processing of data



## **1. INTRODUCTION**

La directive cadre sur l'eau (DCE) adoptée en 2000 fixe des objectifs d'atteinte du bon état des eaux. A partir de l'état des lieux des bassins, des résultats des programmes de surveillance et des analyses économiques, des programmes de mesures et d'actions nécessaires à l'atteinte des objectifs doivent être définis puis évalués.

Le guide européen CIS n°19 (2009) sur la surveillance des paramètres chimiques dans les eaux de surface mentionne au chapitre 7 qu'il est souhaitable d'introduire d'autres techniques que l'analyse d'échantillons ponctuels par des méthodes d'analyses classiques afin d'améliorer la qualité de l'évaluation de l'état écologique réalisée.

L'analyse en continu permet de suivre des paramètres essentiels au contrôle de la qualité de l'eau avec un pas de temps suffisamment court pour permettre une étude détaillée de la variabilité temporelle. Elle présente l'avantage notamment d'acquérir des données représentatives des variations du milieu, par comparaison aux campagnes de prélèvements ponctuels à intervalle fixe qui peuvent passer à côté d'événements importants comme un pic de concentration lors d'une crue ou lors de pluies après un épandage de pesticides.

Par ailleurs, en cas de pollutions dues à des accidents industriels ou au transport sur voies navigables par exemple, il est primordial de pouvoir détecter ces événements le plus tôt possible et pouvoir réagir rapidement afin de limiter leurs impacts sur le milieu et ainsi indirectement protéger la ressource en eau potable.

Ainsi, le choix de recourir à des dispositifs de mesure en continu est directement lié aux avantages d'obtenir une mesure rapide (de quelques secondes à quelques minutes), à une fréquence rapprochée (de quelques secondes à quelques heures) et dans la majorité des cas en temps réel. Par ailleurs, il est possible d'utiliser les mesures obtenues pour déclencher automatiquement des actions, comme prélever un échantillon pour analyse complémentaire et/ou arrêter le pompage de la ressource en eau potable.

Afin de mettre en œuvre un dispositif de mesure en continu, il est nécessaire de suivre une procédure constituée de 5 étapes principales comme illustrée dans la Figure 1.

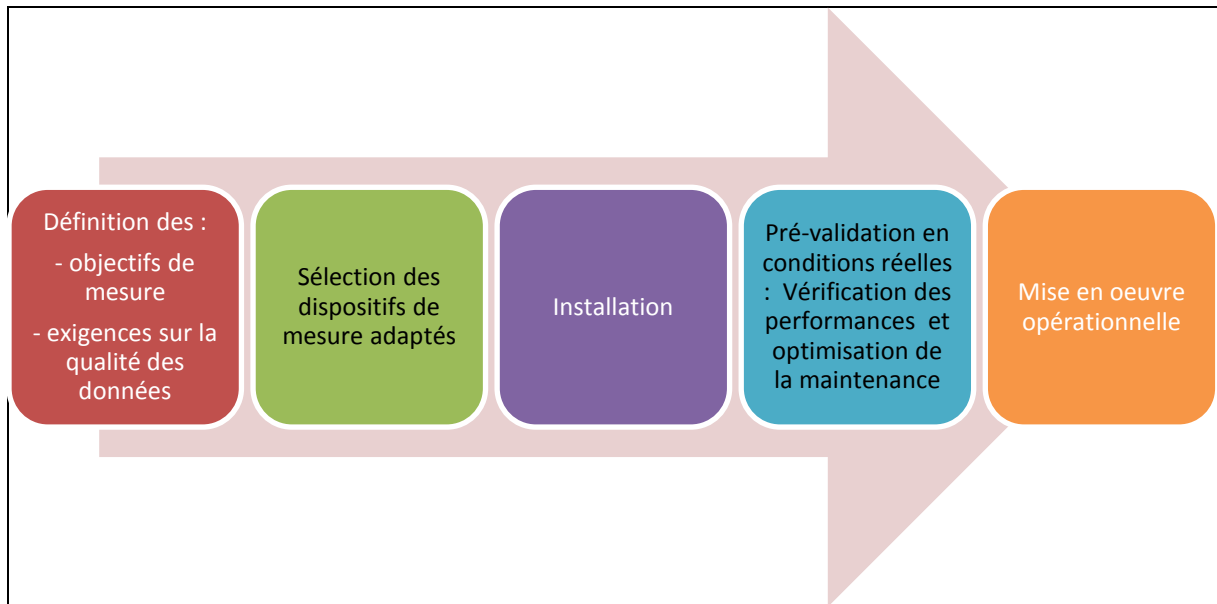


Figure 1 : Les différentes étapes de la mise en œuvre d'un dispositif de mesure en continu

Cette procédure peut aussi être décrite au travers du cycle de vie d'un dispositif de mesure comme indiqué dans la norme NF T90-552 « Mesure en continu pour l'eau - Spécifications pour l'étude, la mise en œuvre et l'exploitation », qui décrit une méthodologie de mise en œuvre de la mesure en continu.

Comme il existe peu de guides et documents concernant les dernières étapes du processus pour la surveillance des milieux naturels (de l'installation à la mise en œuvre opérationnelle de dispositifs de mesure en continu), le besoin de mettre à disposition des utilisateurs potentiels un document décrivant les bonnes pratiques pour l'ensemble des différentes étapes du processus a été discuté au sein du GT instrumentation du pôle de compétitivité Hydreos.

Afin de répondre à ce besoin, Aquaref a proposé de rédiger des recommandations pour la surveillance des milieux naturels, dans lequel chaque étape est détaillée et des recommandations sont faites pour une mise en œuvre optimale des dispositifs de mesure en continu.

## **2. OBJECTIFS DE LA MESURE ET EXIGENCES SUR LA QUALITE DES DONNEES**

Il est très important de bien définir l'objectif de la mesure en amont de la mise en place d'un dispositif de mesure en continu et de décrire cet objectif de la manière la plus détaillée possible.

Ainsi, doivent être précisés :

- L'objectif général
- Le(s) paramètre(s) ciblé(s)
- L'application visée
- Les caractéristiques de l'eau à mesurer (composition de l'eau, variation de température, présence d'interférents potentiels comme les matières en suspension, le caractère encrassant ou entartrant de l'eau etc.)

- Les performances attendues

Il existe plusieurs objectifs de mesure mettant en œuvre la mesure en continu :

- L'objectif des stations d'alerte est de vérifier que certains seuils prédéfinis ne sont pas dépassés. Ces stations d'alerte peuvent par ailleurs être déployées sur le milieu en amont d'une usine d'eau potable. Ainsi elles servent à protéger la production d'eau potable de toute contamination ou rejet accidentel.
- Des dispositifs de mesure peuvent aussi être utilisés pour connaître la variabilité temporelle d'une masse d'eau et ainsi optimiser le programme de surveillance en intégrant cette variabilité.
- L'évaluation de l'impact, sur les cours d'eau de bassins versants urbanisés ou non, de rejets (industriel, artisanal, urbain) ou de conditions environnementales extrêmes (pluie d'orages) par exemple, peut être réalisée en utilisant des dispositifs de mesure en continu.
- Couplée à une mesure de débit, il est possible d'évaluer des flux d'éléments ou polluants à l'exutoire d'un bassin versant.
- La mesure en continu peut être utilisée pour mieux appréhender le fonctionnement de bassins versants, notamment ceux caractérisés par une hydrologie complexe (par exemple en zone karstique).

L'étape la plus délicate consiste à traduire l'objectif de mesure en exigences de qualité ou performances quantifiables sur les dispositifs de mesure en continu. A titre d'exemple, cette étape est déclinée pour les différents objectifs cités précédemment dans le Tableau 1.

**Tableau 1 : Exemples d'exigences de qualité ou de performances pour les dispositifs de mesure en continu pour différents objectifs de mesure**

| Objectif de mesure                                                                                                                                | Exemples d'exigences de qualité ou de performances associées                                                                                                                              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Alerte de dépassement de seuils                                                                                                                   | Limite de quantification au 1/3 du seuil et exactitude au niveau du seuil de 10%.<br>La valeur du seuil doit se situer idéalement au milieu de la gamme de mesure du dispositif de mesure |
| Alerte en cas de pollution pour la protection de la ressource en eau potable                                                                      | Limite de quantification au 1/3 du seuil et exactitude au niveau du seuil de 10%.<br>La valeur du seuil doit se situer idéalement au milieu de la gamme de mesure du dispositif de mesure |
| Identification de la variabilité temporelle et optimisation du programme de surveillance                                                          | La mesure ne doit pas contribuer à plus de 20 % de la variance totale (mesure et variabilité temporelle)                                                                                  |
| Evaluation de l'impact d'ouvrage (rejet industriel, rejet urbain) ou de conditions environnementales (temps de pluie / orages) sur un cours d'eau | La mesure ne doit pas contribuer à plus de 20 % de la variance totale (mesure et variabilité temporelle)                                                                                  |
| Evaluation de flux (couplage avec une mesure de débit)                                                                                            | Incertitude maximale tolérée de 10 % pour des paramètres majeurs, de 30 % pour des composés traces, afin de limiter l'impact sur le calcul de flux                                        |
| Etude de fonctionnement de bassin versant                                                                                                         | Incertitude maximale tolérée de 10 % pour les paramètres majeurs                                                                                                                          |

### **3. SELECTION DES DISPOSITIFS DE MESURE**

Le choix d'un dispositif de mesure en continu doit se faire pour s'assurer que les performances et les capacités des instruments permettent de répondre à l'objectif de mesure et aux exigences de qualité associées pour l'application visée, en tenant compte des facteurs environnementaux spécifiques.

Dans un premier temps, les grands principes de mesure sont décrits et dans un deuxième temps une approche méthodologique permettant de sélectionner un dispositif de mesure est proposée.

#### **3.1 PRINCIPES DE MESURE EXISTANTS**

Les dispositifs de mesure en continu sont décrits dans ce paragraphe. Il s'agit des sondes électrochimiques (par exemple les électrodes sélectives), des systèmes basés sur une réaction chimique (par exemple les méthodes colorimétriques), ou encore des systèmes basés sur une mesure optique directe (par exemple par absorbance UV-visible ou fluorescence UV).

##### **3.1.1 SONDES ELECTROCHIMIQUES**

Les sondes électrochimiques comprennent notamment les électrodes à cellule de graphite (conductivité), les électrodes de Clark (oxygène dissous) et les électrodes sélectives (ISE). Ces dernières ont été développées pour la mesure de différents

ions, comme par exemple les protons (pH), le calcium, les chlorures, l'ammonium, les nitrates etc.

Les sondes électrochimiques peuvent être soit immergées dans le fluide à mesurer (in situ), soit être intégrées dans un analyseur en ligne.

Dans la pratique, il est important de compenser de potentielles interférences. Par exemple, une électrode sélective aux chlorures peut être utilisée pour compenser l'influence des chlorures sur la mesure des nitrates.

Les avantages des électrodes sélectives sont, d'une part, leur très faible coût d'investissement, d'environ 0,5 à 3 k€ et, d'autre part, le fait que ces sondes n'utilisent pas de réactifs. Cependant, les électrodes spécifiques sont rarement utilisées comme dispositif en continu sur des longues périodes, car elles nécessitent un étalonnage très régulier, souvent manuel, en raison des dérives importantes pouvant avoir lieu.

### **3.1.2 ANALYSEURS BASES SUR UNE REACTION CHIMIQUE, ENZYMATIQUE OU BIOLOGIQUE**

Les dispositifs de mesure en continu basés sur une réaction chimique ou enzymatique, sont typiquement des adaptations de méthodes de laboratoire bien maîtrisées. Par exemple, un complexe coloré est formé par réaction chimique et une mesure d'absorbance à une longueur d'onde spécifique est réalisée. Des étapes de minéralisation, réduction ou oxydation (chimique ou par UV) permettent de mesurer un grand nombre d'espèces chimiques par cette méthode. Ainsi, pour les nutriments, il est possible de mesurer les nitrates, les nitrites, l'ammonium, l'azote total, les orthophosphates, le phosphore total dans les eaux par méthode colorimétrique.

Les analyseurs sont généralement constitués de pompes péristaltiques (prise d'échantillon, ajouts de réactifs), de tuyaux, de vannes, de burettes et d'un photomètre. Ces dispositifs peuvent ainsi fonctionner en injection de flux (FIA), en mode séquentiel (SFA) ou en flux continu (CFA).

Ces analyseurs requièrent des réactifs qu'il est nécessaire de réapprovisionner et qui peuvent se dégrader dans le temps. Un auto-étalonnage périodique est donc souvent nécessaire, afin d'améliorer les performances métrologiques (fidélité et justesse) des analyseurs.

Des versions immergeables de ces analyseurs sont aussi disponibles pour des déploiements in situ (en milieu marin par exemple).

Le coût d'investissement de ces analyseurs est important (typiquement entre 5 et 50 k€).

### **3.1.3 SYSTEMES BASES SUR UNE MESURE OPTIQUE DIRECTE**

Les dispositifs de mesure en continu basés sur une mesure optique directe fonctionnent selon les principes de mesure suivants :

- absorbance dans le domaine UV-visible (190-700 nm)
- fluorescence
- luminescence
- néphélométrie infra-rouge

Il existe 2 principaux types de mesure pour les dispositifs utilisant la mesure par absorbance UV-visible :

- 1) la mesure à une ou plusieurs longueurs d'onde prédéterminées,
- 2) la mesure sur l'ensemble du spectre UV-visible. Un traitement du signal, par exemple par déconvolution ou par régression multilinéaire, permet ensuite de déterminer les concentrations des différentes espèces après étalonnage avec des échantillons analysés au laboratoire.

L'intérêt de mesurer l'ensemble du spectre UV-visible est que l'utilisateur peut avoir une information quantitative par l'estimation de la concentration des paramètres surveillés en fonction de l'étalonnage réalisé, ainsi qu'une information qualitative car le spectre est comparé au modèle numérique interne et chaque résultat peut être alors validé par un écart de restitution ce qui permet de détecter l'apparition d'anomalies ou de substances indésirables. Cependant, un étalonnage local est souvent nécessaire pour ajuster les paramètres d'étalonnage à la matrice réelle mesurée (il est alors important d'effectuer cet étalonnage en intégrant au maximum tous les interférents possibles, et ceci dans différentes conditions, comme par exemple par temps sec ou temps de pluie).

Les paramètres qui peuvent être mesurés par absorbance dans le domaine UV-visible sont notamment les caractéristiques de la matière organique (par exemple le carbone organique dissous ou total, la demande chimique en oxygène, l'absorbance à 254 nm), la turbidité, les nitrates ainsi que les nitrites depuis peu, qui sont les seuls nutriments analysables directement par cette méthode.

La luminescence est notamment utilisée pour mesurer l'oxygène dissous, alors que la néphélométrie est la méthode utilisée pour mesurer la turbidité.

Les configurations possibles des dispositifs de mesure basés sur une mesure optique directe se présentent sous forme de sondes immergeables (in situ) ou d'analyseurs en ligne avec pompage de l'échantillon dans une chambre de mesure.

### **3.2 METHODOLOGIE DE SELECTION D'UN DISPOSITIF DE MESURE**

La norme NF T90-552 « Mesure en continu pour l'eau - Spécifications pour l'étude, la mise en œuvre et l'exploitation », qui décrit une méthodologie de mise en œuvre de la mesure en continu, propose des annexes utiles pour la sélection de dispositifs de mesure en continu. En particulier les annexes :

- C (normative) - Questionnaire relatif à l'équipement d'un point de mesure d'analyse et de surveillance des eaux
- D (normative) - Eléments du cahier des charges
- F (informative) - Fiche d'adéquation capteur/analyseur ou d'une chaîne de mesure

Par ailleurs, une approche structurée a été proposée dans le cadre du programme Aquaref (Guigues et Cabillic, 2013) pour permettre de choisir de manière objective un instrument de mesure déployable sur le terrain (Figure 2). Celle-ci intègre les différentes contraintes techniques et opérationnelles ainsi que des considérations économiques. Elle est brièvement décrite dans la suite du paragraphe.

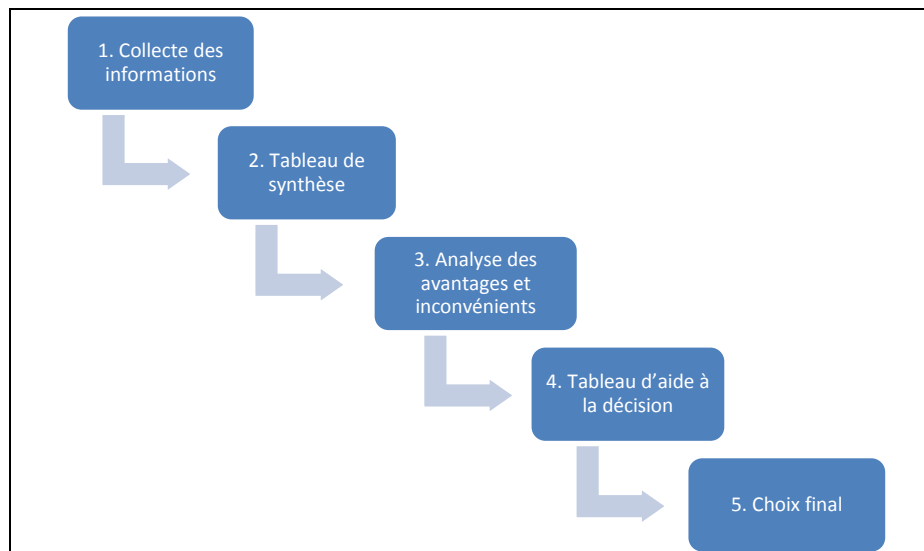


Figure 2 : Démarche structurée permettant de choisir un dispositif de mesure (d'après Guigues et Cabillic, 2013 ; Bende-Michl et Hairsine, 2010)

### 3.2.1 COLLECTE DES INFORMATIONS ET TABLEAU DE SYNTHESE

Les questions à se poser lors du choix d'un instrument de mesure pour la mesure de paramètres de la qualité des eaux de surface sont résumées ci-après :

- Performances et configuration :
  - Quels sont les composés mesurés ?
  - Quel est le principe de mesure ?
  - Quelles sont les performances métrologiques (fidélité, justesse, incertitude, etc.) ?
  - Quelles sont la limite de quantification et la gamme de mesure ?
  - Quels sont le temps de réponse et la fréquence de mesure ?
  - Quels sont les moyens d'enregistrement et de transmission de données ?
  - Quels sont les moyens d'auto-nettoyage ?
- Conditions de fonctionnement :
  - Quelle est la demande énergétique ?
  - Quelles sont les conditions d'utilisation (température, humidité) ?
  - Quelle est la fréquence de l'étalonnage nécessaire ?
  - Quelle est la maintenance à mettre en place (type et fréquence) ?
- Financières :
  - Quel est le coût d'investissement ?
  - Quel est le coût d'installation ?
  - Quel est le coût de la maintenance ?

- Quelle est la durée de garantie ?

Un inventaire des dispositifs de mesure commercialement disponibles a été réalisé dans le cadre du programme Aquaref (Gantois et al., 2016). Il est ainsi possible de connaître l'offre sur le marché par paramètre physico-chimique suivi dans l'eau et par conséquent sélectionner une première liste de fabricants à consulter en vue de collecter les informations nécessaires.

Les limites de quantification les plus faibles sont généralement obtenues avec les analyseurs basés sur une réaction chimique, enzymatique ou biologique. En ce qui concerne la gamme de mesure, certains dispositifs peuvent être configurés à la demande, notamment en incluant des boucles de dilution.

En ce qui concerne les conditions opératoires, il est important de connaître la gamme de température de fonctionnement car les variations importantes de température peuvent par exemple impacter les mesures effectuées si le principe de mesure utilisé est température dépendant et si aucun système de compensation n'est prévu ou encore avoir une influence sur la stabilité des réactifs pour les analyseurs basés sur une réaction chimique.

Aucune information n'est généralement fournie explicitant comment les performances déclarées par les fabricants ont été évaluées. L'USGS (United State Geological Survey - Institut d'études géologiques des Etats-Unis) recommande de choisir des dispositifs de mesure en continu dont les performances ont été évaluées par une tierce partie et selon des protocoles communs. Si ce n'est pas le cas, les performances doivent être vérifiées avant la mise en fonctionnement des dispositifs de mesure en continu. Les protocoles de la norme prEN 17075 sont particulièrement bien adaptés pour cela.

Les besoins énergétiques doivent être définis, en relation avec les contraintes du site, notamment en fonction de la disponibilité ou non du courant continu. En effet, les analyseurs basés sur une réaction chimique, enzymatique et biologique sont très consommateurs en énergie (pompes de prélèvement et ajouts de réactifs) et peuvent rarement être installés sur des stations autonomes électriquement.

Lors de la sélection d'un dispositif de mesure en continu, il est important de calculer correctement les coûts associés, en incluant le coût d'investissement, qui peut être très variable d'un dispositif à l'autre, le coût de fonctionnement (consommables, réactifs etc.), le coût de l'infrastructure nécessaire à l'installation du dispositif, et le coût de maintenance pour pouvoir assurer une qualité de donnée constante dans le temps.

Les analyseurs basés sur une réaction chimique, enzymatique ou biologique ont tendance à être plus chers, alors que les sondes électrochimiques sont les moins chères sur le marché.

Les sondes électrochimiques nécessitent aussi d'investir dans un microprocesseur / transmetteur si une mesure en temps réel est souhaitée. La majorité des dispositifs de mesure en continu peut être équipée de systèmes de transmission de données à



distance. Cependant, le coût associé va grandement dépendre du type de transmission choisi et du flux de données à transmettre.

Les coûts de maintenance doivent être évalués de manière approfondie car ils peuvent être très prohibitifs dans certains cas. Ainsi il est nécessaire de bien définir la fréquence et le type de maintenance nécessaire. Les sondes électrochimiques requièrent souvent un étalonnage fréquent, souvent manuel qui ne peut être réalisé que lors des visites sur site. Si les dispositifs sont déployés in situ, une adaptation de la fréquence de maintenance pour diminuer l'impact de l'encrassement bactérien notamment sur les électrodes ou les sondes optiques sera nécessaire. Des systèmes d'autonettoyage (balais mécaniques, air comprimé etc.) peuvent permettre de diminuer la fréquence des visites sur site pour les systèmes in situ.

Un tableau de synthèse des spécifications techniques peut être alors construit en compilant l'ensemble des informations collectées, afin de faciliter la visualisation des informations recueillies. Un exemple est proposé dans la note Aquaref qui explique comment choisir un dispositif de mesure pour la mesure des nutriments dans l'eau (Guigues et Cabillic, 2013).

### **3.2.2 ANALYSE DES AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES DIFFERENTS DISPOSITIFS**

Avant toute sélection du dispositif de mesure, une analyse des risques doit être entreprise (avantages et inconvénients des différents aspects techniques, opérationnels et financiers).

Un exemple concret concernant les aspects liés à la maintenance, l'installation, et les coûts associés des sondes électrochimiques, des analyseurs basés sur une réaction chimique et des systèmes basés sur une mesure optique directe est présenté dans le Tableau 2.

**Tableau 2 : Exemple de considérations techniques et des contraintes associées pour des dispositifs de mesure en continu pour chaque principe de mesure (d'après Bende-Michl et Hairsine, 2010)**

| Considérations complémentaires                      | Sondes électrochimiques                                                                                                                                                                                                                              | Analyseurs basés sur une réaction chimique (colorimétrie)                                                                                                                                                                                                                                                                      | Systèmes basés sur une mesure optique directe (absorbance UV-vis)                                                                                                                                                                                                                |
|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Maintenance</b>                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Etalonnage et nettoyage : variable entre 1 jour et 6-8 semaines selon les produits</li> </ul>                                                                                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Remplacement des réactifs et nettoyage des tubulures : la fréquence dépend de la consommation des réactifs et de la durée de stabilité, typiquement entre 2 et 8 semaines</li> </ul>                                                                                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nettoyage : dépend du taux d'encrassement, typiquement entre 2 et 8 semaines</li> </ul>                                                                                                                                                 |
| <b>Installation</b>                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• In situ (majoritairement) : <ul style="list-style-type: none"> <li>- sécurisation nécessaire contre les débris, cailloux lors des crues</li> <li>- accès difficile en période de gel</li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• In situ : sécurisation nécessaire contre les débris, cailloux lors des crues</li> <li>• Sur site : isolation thermique et gestion des risques chimiques</li> <li>• Les réactifs peuvent être sensibles à la lumière et aux changements rapides de températures (nuit/jour)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• In situ (majoritairement) : <ul style="list-style-type: none"> <li>- sécurisation nécessaire contre les débris, cailloux lors des crues</li> <li>- accès difficile en période de gel</li> </ul> </li> </ul>                             |
| <b>Révision périodique et changement des pièces</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dégradation de la membrane sélective, entre 6 et 18 mois selon les produits</li> </ul>                                                                                                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Usure des composants « hardware » qui dépend de la fréquence d'utilisation et de la qualité des composants</li> <li>• Révision annuelle pour vérifier / changer les tuyaux, filtres et pompes péristaltiques</li> </ul>                                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Durée de vie des lampes UV, entre 1 à 5 ans selon les produits</li> </ul>                                                                                                                                                               |
| <b>Coûts additionnels</b>                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Système d'autonettoyage</li> <li>• Changement des membranes</li> <li>• Microprocesseur / transmetteur</li> <li>• Système de fixation in situ</li> </ul>                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Préparation des réactifs et étalons</li> <li>• Gestion des déchets</li> <li>• Pompe d'échantillonnage de la rivière</li> <li>• Système de fixation</li> <li>• Système de filtration</li> </ul>                                                                                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Système d'autonettoyage</li> <li>• Microprocesseur / transmetteur</li> <li>• Système de fixation in situ</li> <li>• Adaptation de la configuration des sondes aux vues des conditions très variables de turbidité en rivière</li> </ul> |

### 3.2.3 TABLEAU D'AIDE A LA DECISION ET CHOIX FINAL

A partir du tableau de synthèse et de l'analyse des avantages et inconvénients de chaque configuration, il est proposé de définir une note qualitative graduelle (allant de -- à ++ par exemple correspondant à 'très défavorable' à 'très favorable' respectivement) en fonction des objectifs de mesure et des contraintes spécifiques du site et de visualiser chaque note qualitative dans un tableau de synthèse.

L'ensemble de la démarche pour sélectionner des dispositifs de mesure est illustré au travers de l'exemple du suivi des nutriments azotés et phosphorés à haute fréquence et pendant une durée de déploiement minimale de 3 ans sur un bassin versant en Australie proposé par Bende-Michl et Hairsine en 2010 (Guigues et Cabillic, 2013).

## 4. INSTALLATION

Les différentes questions à se poser avant l'installation d'un dispositif de mesure en continu sont résumées dans la Figure 3.

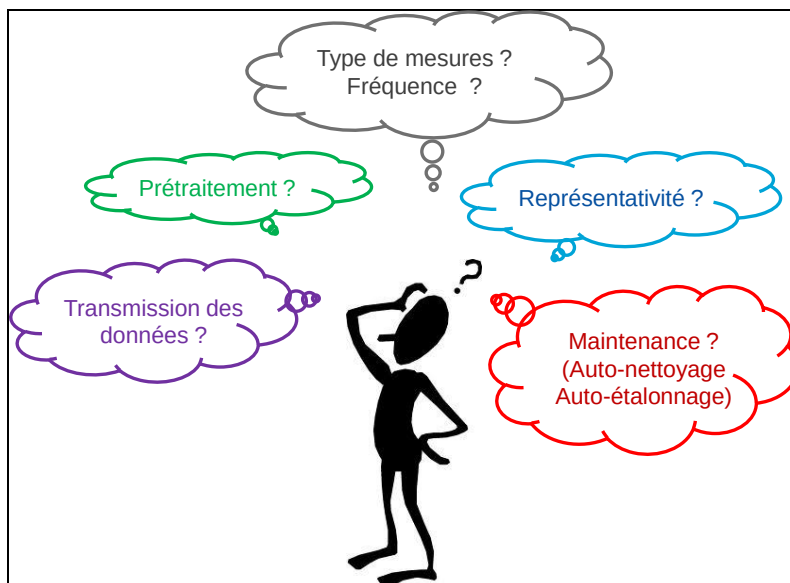


Figure 3 : Points à préciser avant l'installation d'un dispositif de mesure en continu

### 4.1 REPRESENTATIVITE DE LA MESURE

Obtenir des données représentatives de la masse d'eau à surveiller fait souvent partie intégrante des objectifs de mesure.

Pour s'assurer de la bonne représentativité des mesures, il est nécessaire de réaliser des études au préalable pour caractériser la variabilité spatiale des paramètres dans le cours d'eau ou le plan d'eau (section transversale du cours d'eau, profils en profondeurs en plan d'eau etc.) et ceci dans différentes conditions de régime hydrologique.

Par ailleurs, pour aider à définir le meilleur emplacement où positionner les capteurs ou les crépines des pompes, il est pertinent de s'appuyer sur les normes relatives à l'échantillonnage des eaux. En effet, ces normes fournissent des recommandations pour réaliser un échantillonnage représentatif.

Les normes NF EN ISO 5667-1 (2007), NF EN ISO 5667-3 (2013) et NF EN ISO 5667-14 (2017), fournissent des recommandations sur la stratégie d'échantillonnage, le conditionnement, le transport et le stockage des échantillons, l'assurance qualité et les contrôles qualité.

Par ailleurs, les normes NF ISO 5667-6 (2016) et FD T90-523-1 (2018) émettent des recommandations sur l'échantillonnage en cours d'eau : le prélèvement doit être réalisé dans la veine principale du cours d'eau, dans une zone homogène, à une hauteur sous le niveau d'eau de 30 cm ou à mi-hauteur.

Quant à la norme ISO 5667-4 (2016) spécifique à l'échantillonnage en plan d'eau, elle recommande la réalisation d'un profil en profondeur afin d'échantillonner dans une zone homogène.

Dans certains cas, notamment lors de la mise en évidence d'une stratigraphie verticale d'un plan d'eau ou d'une hétérogénéité spatiale dans la section transversale d'un très grand cours d'eau, il peut être pertinent d'installer plusieurs capteurs dans chaque zone homogène identifiée. Cette situation peut aussi justifier la mise en place d'une station avec pompage, en installant plusieurs crépines de prise d'eau pour tenir compte de l'hétérogénéité spatiale de la masse d'eau.

#### 4.2 CONFIGURATION DES STATIONS

Les caractéristiques du cours d'eau ou du plan d'eau, les contraintes physiques du site, les exigences liées à la maintenance des dispositifs de mesure sont des points qui entrent dans le choix de la configuration de la station de mesure.

Il existe principalement deux types de configuration :

- In situ : les capteurs sont directement immergés dans la masse d'eau
- on-line ou déportée : l'eau est pompée et amenée dans un bac / récipient ou un système de canalisation dans lequel les capteurs sont immergés.

Quelques exemples de conception de stations sont proposés dans la suite du paragraphe.

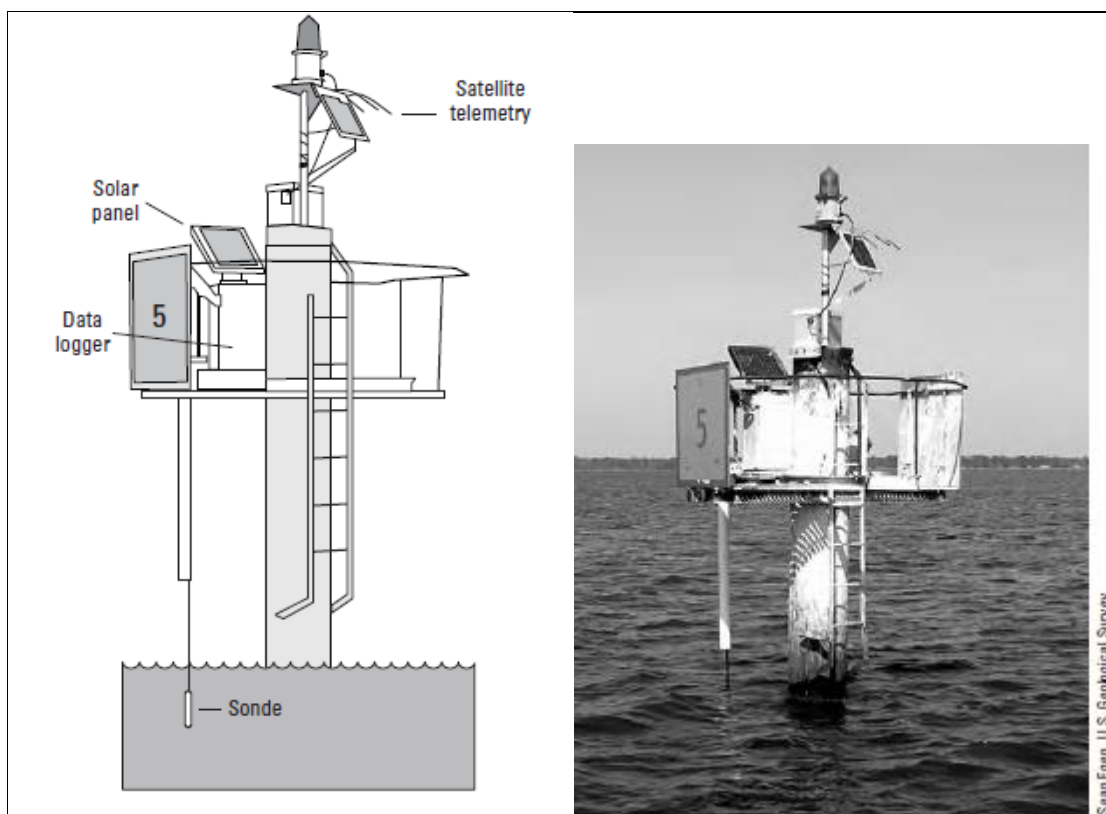


Figure 4 : Plateforme autonome adaptée pour les plans d'eau ou les très grandes rivières (d'après USGS 2006)

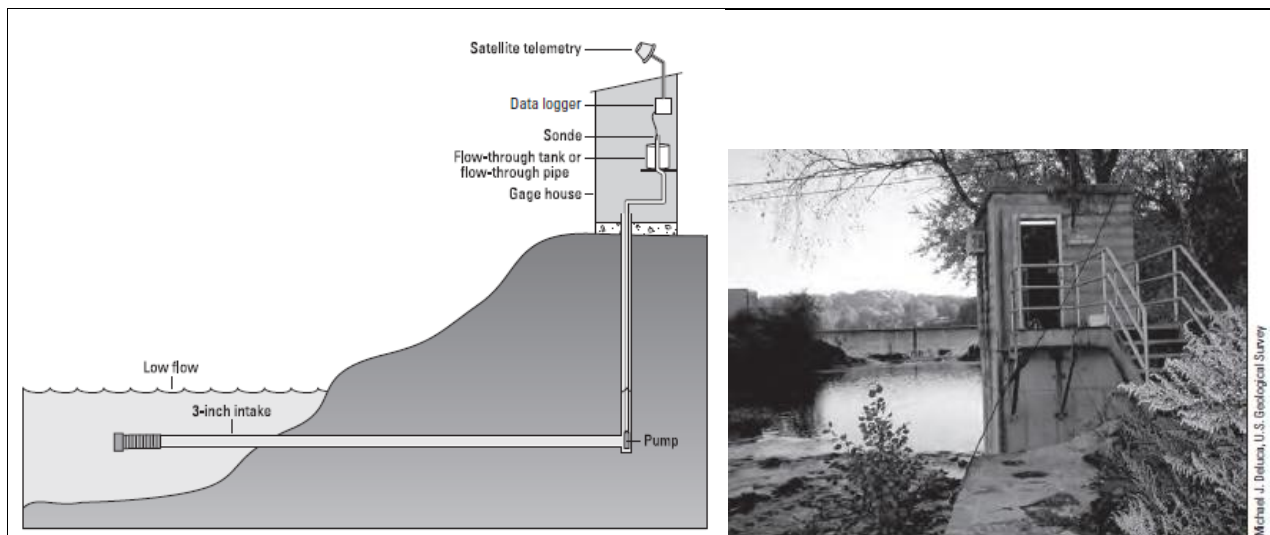


Figure 5 : Station en rivière de type on-line avec crépine de pompage fixe (d'après USGS 2006)



Figure 6 : Station en rivière de type on-line avec pompage et mesure dans un bac (d'après GEMCEA, 2009)

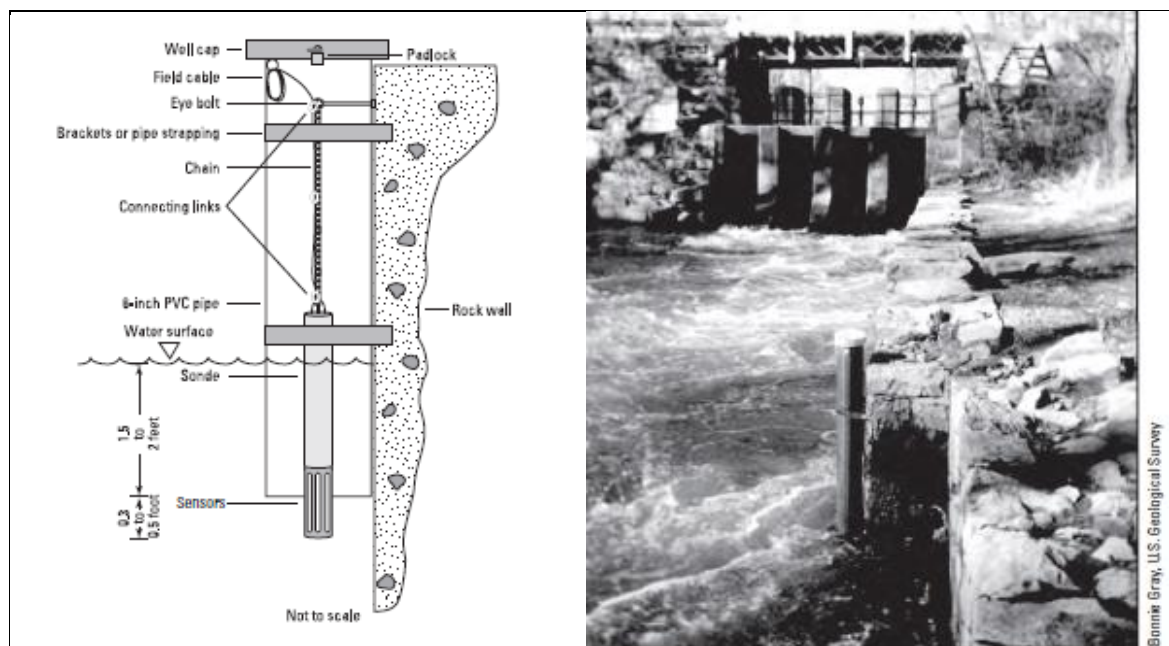


Figure 7 : Station en rivière de type in situ avec les capteurs en position verticale (d'après USGS 2006)

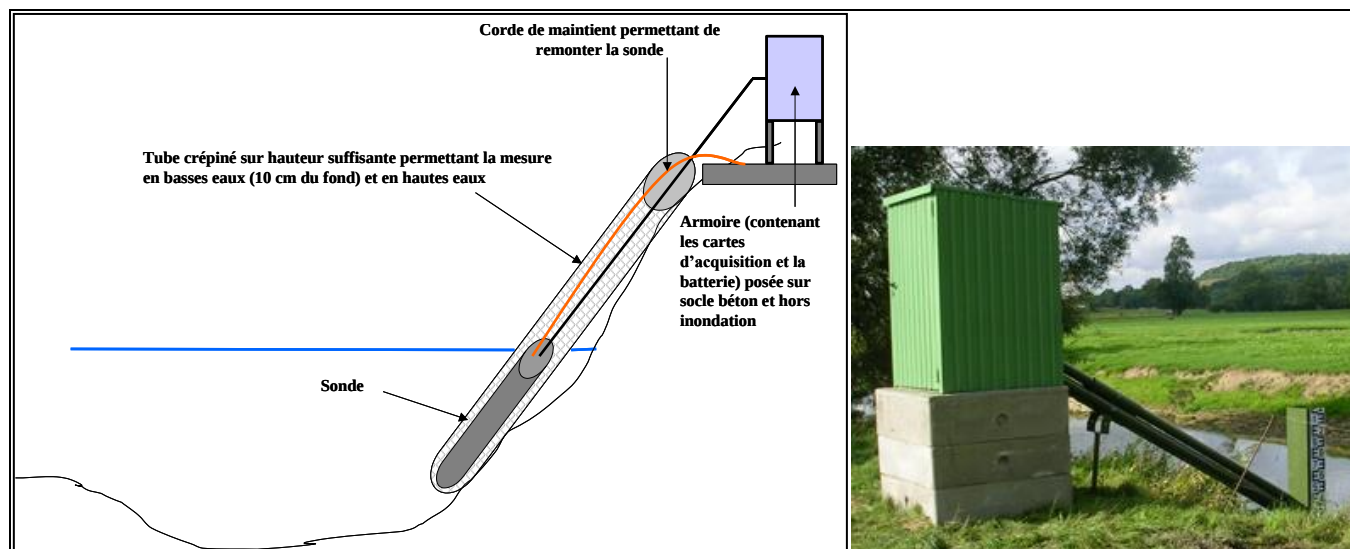


Figure 8 : Station en rivière de type in situ avec les capteurs en position oblique (d'après Guigues, 2010)

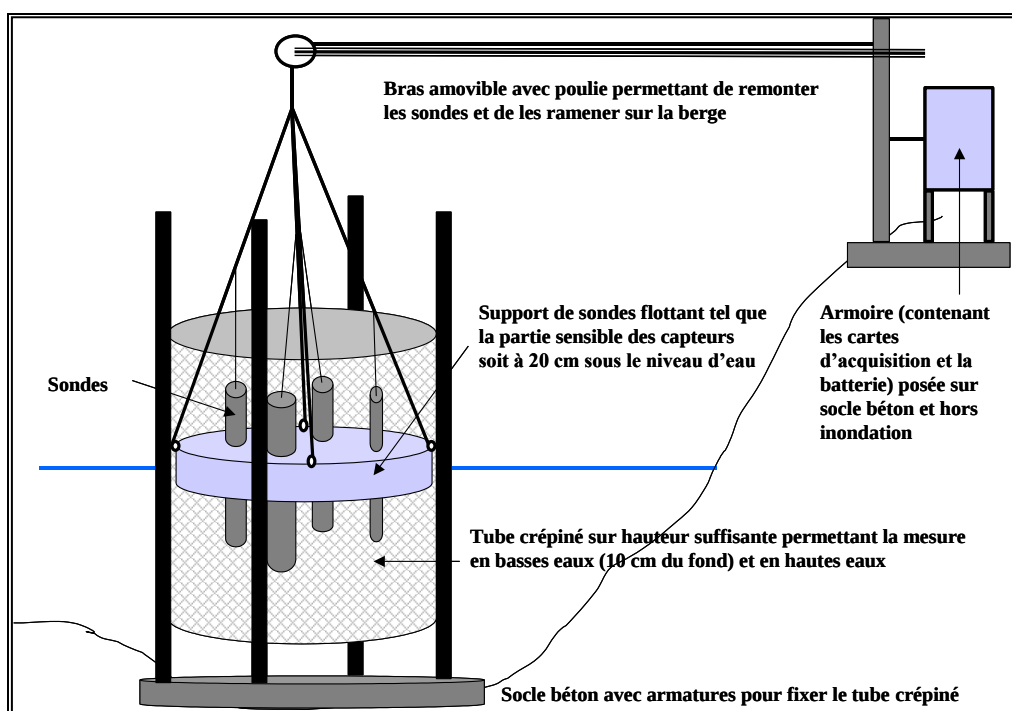


Figure 9 : Station en rivière de type in situ avec profondeur de mesure ajustable (d'après Guigues, 2010)

Les avantages et inconvénients des deux types de configuration sont résumés dans le Tableau 3.



**Tableau 3 : Avantages et inconvénients liés aux configurations on-line ou déportée et in situ**

| Avantages                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Inconvénients                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Configuration On-line ou déportée                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• local sécurisé limitant le vandalisme</li> <li>• installation possible de capteurs et d'analyseurs à coût élevé</li> <li>• capteurs toujours immergés</li> <li>• maintenance facilitée, pouvant être réalisée dans le local</li> <li>• possibilité d'avoir un nettoyage chimique automatique des capteurs et du bac de mesure (chlore, acide)</li> <li>• possibilité d'ajouter des échantillonneurs intégratifs dans le bac</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• mesures T et O<sub>2</sub> après pompage donc potentiellement non représentatives</li> <li>• entretien des pompes</li> <li>• infrastructure plus importante</li> <li>• nécessite un raccordement électrique</li> <li>• gestion des déchets</li> </ul>                                 |
| Configuration in situ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• très bonne représentativité de la mesure pour les paramètres non conservatifs</li> <li>• autonomie énergétique envisageable</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• maintenance plus fréquente en raison de l'encrassement des capteurs immergés</li> <li>• accès pour la maintenance en période de crue à prévoir</li> <li>• vandalisme</li> <li>• capteurs à sec si niveau d'eau très bas</li> <li>• protection nécessaire contre les débris</li> </ul> |

#### 4.3 SÉLECTION DU SITE

La sélection d'un site pour installer et mettre en œuvre un dispositif de mesure en continu doit permettre de répondre aux objectifs de mesure et respecter les exigences de qualité associées.

Les facteurs additionnels à considérer lors de la sélection du site pour l'installation de dispositifs de mesure en continu peuvent être par exemple :

- Caractéristiques du site :
  - Représentatif de la masse d'eau à mesurer
  - Stratification verticale d'un plan d'eau et variation sur la section transversale d'un cours d'eau
  - Amplitude des variations attendues en débit (étiages - crues)
  - Présence de turbulences qui pourrait affecter les mesures
  - Conditions qui pourraient favoriser l'encrassement biologique (quantité importante de sédiments fins, présence d'algues, d'invertébrés etc.)
  - Domaine de concentration des paramètres à mesurer (à partir d'un historique de suivi)
  - Besoins en infrastructure pour protéger les systèmes de mesure contre les débris (lors de crue notamment) ou du vandalisme

- Contraintes liées à l'installation
  - Permis et autorisations nécessaires avant la construction et l'installation
  - Risques environnementaux et de sécurité liés à la construction et l'installation
  - Type de configuration (in situ ou on-line)
  - Coût associé à l'installation
- Contraintes environnementales
  - Régime hydraulique (eau en régime turbulent ou laminaire, niveaux des hautes et basses eaux etc.)
  - Conditions de température et humidité ambiantes
  - Possibilité de disposer d'électricité ou non
- Aspects logistiques
  - Accessibilité (possibilité de parking etc.)
  - Espace suffisant et sécurisé pour réaliser les maintenances
  - Possibilité de réaliser des mesures de débit
  - Accès possible y compris en cas d'évènements extrêmes (crue, vents violents etc.)
  - Zone de couverture téléphonique suffisante.

#### **4.4 CONFIGURATION DES MESURES**

##### **4.4.1 PRETRAITEMENT**

Dans une configuration de type on-line, il peut s'avérer nécessaire de mettre en place un prétraitement de l'eau pompée, comme un système de filtration ; ceci notamment afin d'éviter le colmatage de certains dispositifs de mesure basés sur une réaction chimique, enzymatique ou biologique ou même limiter l'encrassement des capteurs.

Dans ce cas, il est primordial de s'assurer que ce prétraitement n'a pas d'impact sur les paramètres à mesurer. En particulier, pour le phosphore, il faut tenir compte du seuil de filtration dans l'interprétation des données, étant donné que le phosphore est principalement sous formes colloïdales et particulaires (adsorption sur les oxydes de fer).

##### **4.4.2 AUTO-NETTOYAGE**

Différentes techniques pour limiter l'encrassement des capteurs, et potentiellement les dérives de ces capteurs, sont disponibles.

Le choix de la technique d'auto-nettoyage dépend de la nature des capteurs, mais aussi de la configuration de la station.

Ainsi, pour des capteurs in situ, l'auto-nettoyage peut être réalisé au moyen :

- de balais mécaniques (sur batterie)
- d'air comprimé (avec un compresseur ou une bouteille d'air comprimé)



- d'un prétraitement, avec des nanoparticules d'argent par exemple, de certaines sondes optiques

Pour des capteurs installés dans une station de type on-line, il est envisageable d'inclure en plus des nettoyants chimiques (acide, chlore) pour nettoyer les capteurs ou le récipient dans lequel les mesures sont réalisées.

#### **4.4.3 FREQUENCE DE MESURE**

La fréquence de mesure doit être adaptée en fonction de la variabilité temporelle de la masse d'eau.

Il est possible, après l'étude de pré-validation, d'ajuster cette fréquence de mesure afin d'optimiser (voire limiter, si besoin) le nombre de données enregistrées et à exploiter.

Elle doit aussi, dans le cas de systèmes autonomes, être calculée en fonction de la durée entre deux maintenances afin de s'assurer qu'il n'y aura aucune perte de données.

#### **4.4.4 ENREGISTREMENT DES DONNEES ET RECUPERATION DES DONNEES**

Un moyen d'enregistrer automatiquement les mesures et de les stocker doit être disponible.

D'autres informations peuvent aussi être enregistrées automatiquement comme l'historique des étalonnages, le journal des événements (mise en défaut du capteur, alarmes, périodes d'arrêt des mesures etc.).

Il peut aussi être envisagé d'installer un moyen pour transmettre les données et permettre une communication à distance. Ceci présente l'avantage de d'avoir une meilleure réactivité en cas d'événements imprévus ou anormaux.

### **5. PRE-VALIDATION EN CONDITIONS REELLES**

Une pré-validation est nécessaire en amont de la mise en œuvre opérationnelle. Elle permet de :

- Vérifier que les performances des capteurs en conditions réelles répondent bien aux objectifs de mesure et que la gamme de mesure est adaptée
- Optimiser la fréquence de maintenance afin de limiter la dérive potentielle des capteurs.

Un exemple de protocole pour réaliser cette pré-validation est décrit dans la norme prEN 17075.

L'objectif des essais en conditions réelles de la norme prEN 17075 est de démontrer que les performances d'un dispositif de mesure évaluées en conditions

laboratoire sont maintenues dans des conditions réelles représentatives d'une application donnée.

Lors de cet essai, un nombre minimum de 24 mesures de référence doit être réalisé avec une méthode de référence appropriée en parallèle des valeurs obtenues par le dispositif de mesure en continu, afin d'évaluer l'erreur du dispositif de mesure en continu en conditions réelles.

Un plan d'essai documenté doit être établi et comprendre à minima les informations suivantes :

- la description détaillée du site,
- la durée proposée de l'essai, qui est typiquement entre 1 et 3 mois,
- la période envisagée pour l'essai,
- un plan d'échantillonnage et d'analyse pour les 24 mesures de référence incluant le choix de la méthode de référence et ses performances, les méthodes d'échantillonnage et les contrôles qualités appropriés,
- les dispositions pour enregistrer l'ensemble des informations pertinentes.

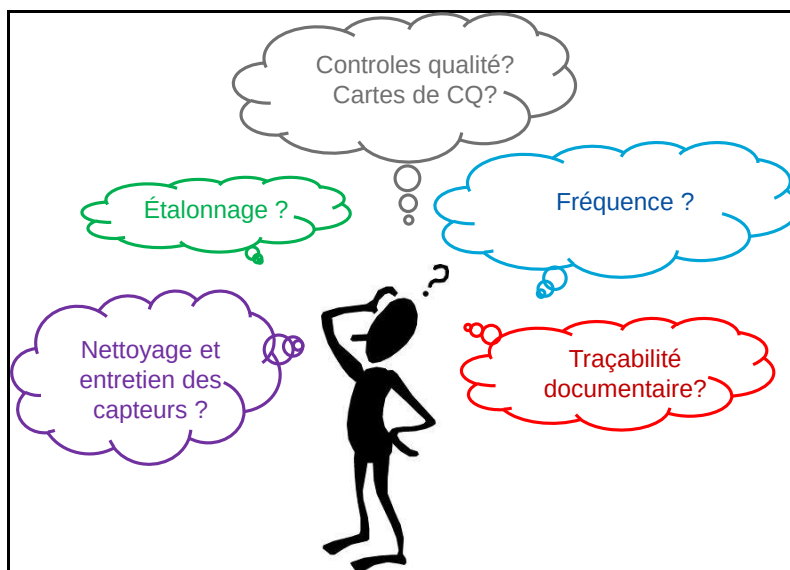
Par ailleurs, les 24 mesures de référence doivent :

- être répartis sur toute la durée de l'essai,
- être pris lors de conditions stables de la masse d'eau,
- idéalement répartis sur l'ensemble de la plage de mesure.

Un exemple d'essai sur site suivant les recommandations de la norme prEN 17075 a été mis en œuvre, avec succès, lors de l'étude Aquaref menée en 2015 sur l'évaluation des performances des dispositifs de mesure pour la surveillance des nutriments et de la matière organique dans les cours d'eau (Guigues et al, 2016).

## **6. MISE EN ŒUVRE OPERATIONNELLE**

Avant la mise en œuvre opérationnelle de dispositifs de mesure en continu, il est nécessaire de préciser différents aspects et définir des protocoles pour l'étalonnage, la maintenance et l'assurance qualité comme illustré dans la Figure 10.



**Figure 10 : Points à préciser avant la mise en œuvre opérationnelle d'un dispositif de mesure en continu**

## **6.1 ETALONNAGE**

### **6.1.1 DEFINITIONS**

Il est nécessaire de bien faire la distinction entre les termes étalonnage, ajustage et vérification. Les définitions du Vocabulaire International de Métrologie (VIM, 2012) sont reprises ci-après, afin de bien expliciter ces trois notions différentes.

**Étalonnage** (VIM, 2.39) : opération qui, dans des conditions spécifiées, établit en une première étape une relation entre les valeurs et les incertitudes de mesure associées qui sont fournies par des étalons et les indications correspondantes avec les incertitudes associées, puis utilise en une seconde étape cette information pour établir une relation permettant d'obtenir un résultat de mesure à partir d'une indication

NOTE 1 Un étalonnage peut être exprimé sous la forme d'un énoncé, d'une fonction d'étalonnage, d'un diagramme d'étalonnage, d'une courbe d'étalonnage ou d'une table d'étalonnage. Dans certains cas, il peut consister en une correction additive ou multiplicative de l'indication avec une incertitude de mesure associée.

NOTE 2 Il convient de ne pas confondre l'étalonnage avec l'ajustage d'un système de mesure, souvent appelé improprement «auto-étalonnage», ni avec la vérification de l'étalonnage.

**Ajustage d'un système de mesure** (VIM 3.11) : ensemble d'opérations réalisées sur un système de mesure pour qu'il fournisse des indications prescrites correspondant à des valeurs données des grandeurs à mesurer

NOTE 1 Divers types d'ajustage d'un système de mesure sont le réglage de zéro, le réglage de décalage, le réglage d'étendue (appelé aussi réglage de gain).

NOTE 2 Il convient de ne pas confondre l'ajustage d'un système de mesure avec son étalonnage, qui est un préalable à l'ajustage.

NOTE 3 Après un ajustage d'un système de mesure, le système demande généralement à être réétalonné.

**Vérification** (VIM 2.44) : fourniture de preuves tangibles qu'une entité donnée satisfait à des exigences spécifiées

NOTE 1 S'il y a lieu, il convient de prendre en compte l'incertitude de mesure.

NOTE 2 L'entité peut être, par exemple, un processus, une procédure de mesure, un matériau, un composé ou un système de mesure.

NOTE 3 Les exigences spécifiées peuvent être, par exemple, les spécifications d'un fabricant.

NOTE 4 La vérification en métrologie légale, comme définie dans le VIML, et plus généralement en évaluation de la conformité, comporte l'examen et le marquage et/ou la délivrance d'un certificat de vérification pour un système de mesure.

NOTE 5 Il convient de ne pas confondre la vérification avec l'étalonnage. Toute vérification n'est pas une validation.

### 6.1.2 CRITERES D'ETALONNAGE

Il est important de définir des critères d'étalonnage pour les dispositifs de mesure en continu pour différentes raisons. En effet, ces critères permettent de savoir quand un étalonnage doit être réalisé et par conséquent quand la maintenance doit être programmée. Ainsi, il n'est pas nécessaire de réaliser un étalonnage systématiquement lors de la maintenance, car dans les limites des critères définis, l'exactitude des données ne sera pas améliorée.

Ces critères doivent être adaptés en fonction des exigences de qualité établies lors de l'étape de définition des objectifs de mesure, mais aussi en fonction des conditions réelles du site sélectionné.

Indirectement ces critères définissent les dérives maximales acceptables pour les dispositifs de mesure en continu, c'est-à-dire les limites au-delà desquelles les données acquises seront dégradées.

Dans les normes « qualité de l'eau » pour les paramètres tels que pH, conductivité, oxygène dissous, turbidité, une seule norme a été identifiée contenant un critère d'étalonnage : NF EN ISO 10523 (2012) pour la mesure du pH. Cette norme est adaptée pour les mesures ponctuelles en laboratoire et sur site. Le critère de vérification de l'étalonnage, sur un étalon différent de ceux utilisés pour l'étalonnage, est de 0,03 unité pH. Pour information, le COFRAC tolère un critère de 0,05 (note d'harmonisation du COFRAC du 12/12/2013).

A titre d'exemple, l'USGS a défini des critères d'étalonnage minimum pour toutes les stations de mesure en continu de surveillance de la qualité de l'eau (Tableau 4). Ces critères tiennent compte de la faible performance de certains capteurs et peuvent par conséquent être adaptées voire améliorées.

**Tableau 4 : Critères d'étalonnage définis par l'USGS pour les paramètres non conservatifs (USGS, 2006)**

| Paramètre       | Critère de conformité d'étalonnage                    |
|-----------------|-------------------------------------------------------|
| Température     | $\pm 0,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$                    |
| Conductivité    | $\pm 5 \text{ }\mu\text{S/cm}$ ou $\pm 3 \text{ } \%$ |
| Oxygène dissous | $\pm 0,3 \text{ mg/L}$                                |
| pH              | $\pm 0,2$                                             |
| Turbidité       | $\pm 0,5 \text{ NTU}$ ou $\pm 5 \text{ } \%$          |

### 6.1.3 PROCEDURE DE VERIFICATION ET D'ETALONNAGE

Le logigramme de la Figure 11 décrit la procédure à suivre pour vérifier l'étalonnage d'un capteur, et le cas échéant réaliser son étalonnage.

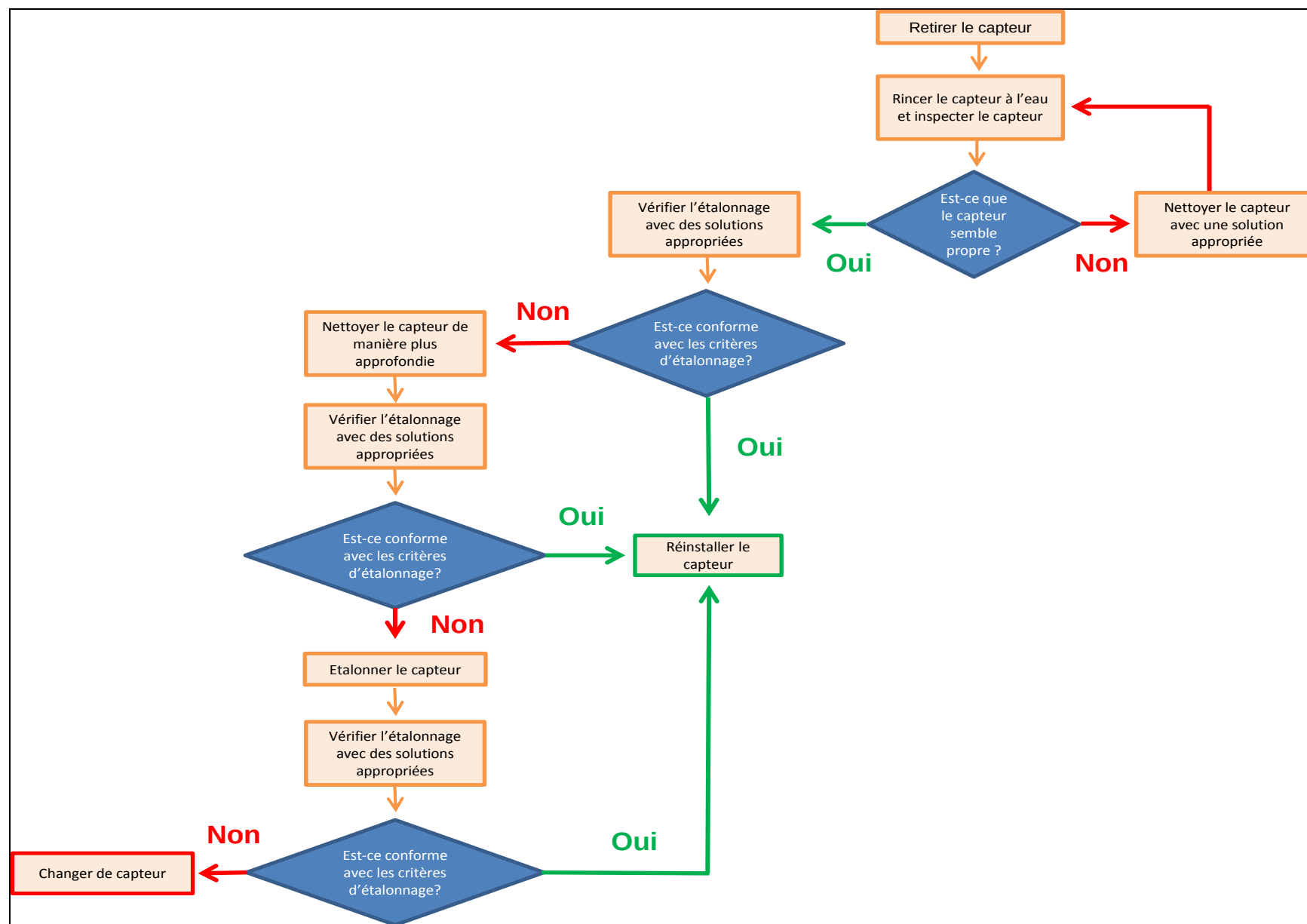


Figure 11 : Procédure de vérification et étalonnage des capteurs

#### 6.1.4 QUELS ETALONS UTILISER ?

Le choix des étalons à utiliser pour vérifier l'étalonnage est important. Il est important de définir quel type d'étalon choisir, le nombre et les valeurs nominales de ces étalons.

##### 6.1.4.1 TYPES D'ETALON

Il existe plusieurs types d'étalon :

- Etalon primaire : étalon établi à l'aide d'une procédure de mesure primaire ou créé comme objet par convention.
- Etalon secondaire : étalon établi par l'intermédiaire d'un étalonnage par rapport à un étalon primaire d'une grandeur de même nature.
- Etalon de travail : étalon qui est utilisé couramment pour étalonner ou contrôler des instruments de mesure ou des systèmes de mesure.

Les avantages et inconvénients de ces types d'étalons sont illustrés dans la Figure 12 .

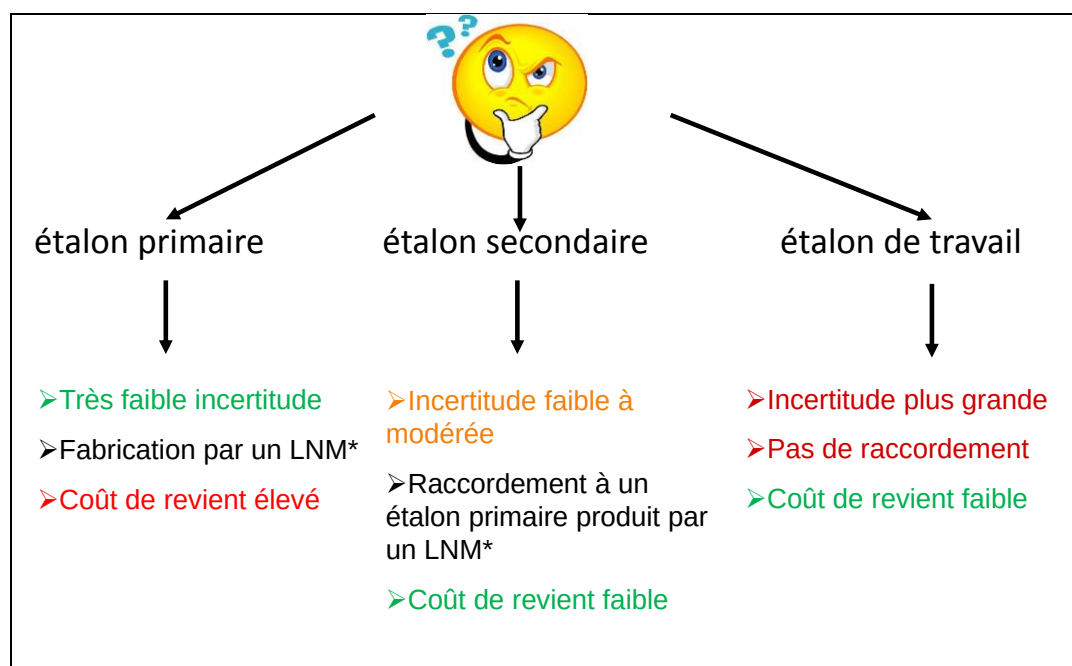


Figure 12 : Avantages et inconvénients des différents types d'étalons (LNM\* : Laboratoire National de Métrologie)

Chaque solution étalon achetée doit être accompagnée d'un certificat.

Les informations sur un certificat doivent inclure à minima :

- La valeur nominale de l'étalon avec son incertitude associée en %
- La date de péremption
- L'organisme accréditeur si la préparation de la solution est réalisée sous accréditation
- La traçabilité métrologique

- Le matériau de référence utilisé pour le raccordement au système international des unités (SI)
- Les conditions d'étalonnage
- Les résultats de l'étalonnage : valeur et incertitude (dans la même unité), autre indication pertinente comme la température de référence pour la conductivité

Le certificat peut aussi inclure en plus des informations sur :

- Les tests d'homogénéité
- La composition de l'étalon
- La préparation de l'étalon
- Les conditions de stockage
- Les conditions d'utilisation conseillée
- Les coefficients de température à appliquer si nécessaire (par exemple pour la conductivité)

Dans le cas de la préparation des solutions étalons par l'opérateur, un mode opératoire doit être disponible et toutes les opérations, ainsi que les réactifs avec leur niveau de pureté utilisés, doivent être consignés sur un support adapté (cahier de laboratoire par exemple).

Idéalement, des étalons secondaires, qui permettent le raccordement au système international des unités (SI), doivent être préférentiellement utilisés s'ils sont disponibles à un coût acceptable. Cependant, des étalons de travail peuvent être utilisés pour les vérifications de routine afin d'optimiser les coûts.

Dans le cas du pH et de la conductivité, il existe des étalons secondaires à des prix acceptables sur le marché.

Pour la turbidité, de par sa définition (NF EN ISO 7027-1, 2016), l'étalonnage initial doit être réalisé au moyen de suspension de formazine. Cependant, pour une vérification sur site, il est préférable d'utiliser d'autres étalons, non toxiques, comme des suspensions de polymère à base de divinylbenzène.

#### **6.1.4.2 NOMBRE ET VALEURS NOMINALES DES ETALONS**

Pour vérifier l'étalonnage d'un dispositif de mesure, il est recommandé d'utiliser 2 étalons à minima. Ceci permet de vérifier qu'il n'y a pas eu de modification de pente et/ ou d'offset depuis la dernière vérification.

Si un étalonnage s'avère nécessaire, les mêmes étalons peuvent être utilisés. Un étalon supplémentaire permet de valider l'étape d'étalonnage.

Le choix de la valeur nominale des 2 étalons doit être fait de manière à encadrer l'étendue des mesures attendue (Figure 13). Pour certains paramètres, comme la conductivité ou la turbidité, un des 2 étalons peut correspondre au zéro. Par contre, pour l'étalon servant à valider l'étalonnage, celui-ci doit se trouver à l'intérieur de l'étendue de mesure attendue.

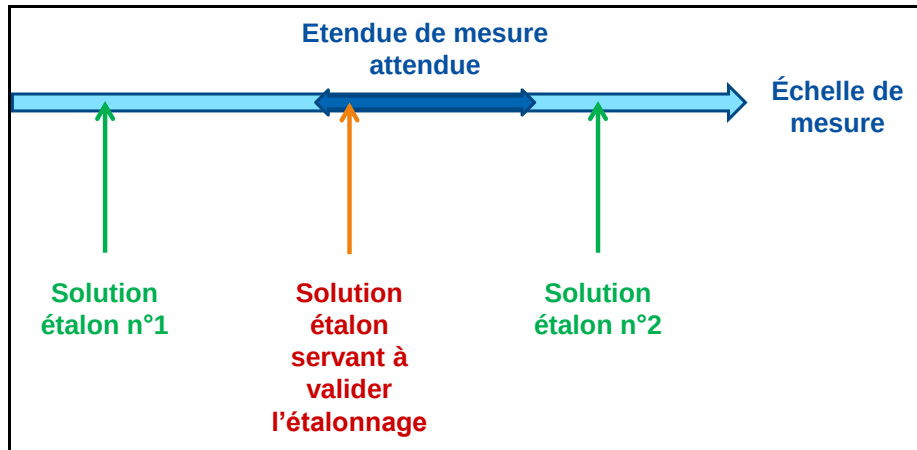


Figure 13 : Vérification et étalonnage à deux solutions étalon (en vert) avec un étalon supplémentaire permettant de valider l'étalonnage (en rouge)

## 6.2 MAINTENANCE

La procédure de maintenance permet de décrire l'ensemble des opérations à réaliser afin d'obtenir des données fiables sur le long-terme.

### 6.2.1 PROCEDURE GENERALE

La procédure générale peut comprendre les opérations suivantes :

- inspection,
- nettoyage des capteurs et infrastructure,
- maintenance des capteurs
- vérification d'étalonnage
- enregistrement des données
- etc.

Il s'agit aussi de comparer systématiquement avant et après maintenance les mesures réalisées par le dispositif de mesure avec des mesures réalisées par une méthode de référence.

Une procédure type est proposée :

- Réaliser une inspection du site
  - Noter les valeurs mesurées par le dispositif de mesure, la date et l'heure et les conditions environnementales ainsi que toute information pertinente
  - Réaliser une mesure au moyen d'un appareil portable étalonné pour les paramètres non conservatifs ou un prélèvement pour une analyse en laboratoire ultérieure pour les autres paramètres
- Retirer le capteur de son emplacement
- Vérifier l'étalonnage au moyen d'au moins 2 solutions étalons. En fonction du critère d'étalonnage, étalonner si nécessaire et vérifier l'étalonnage avec un étalon supplémentaire.
- Remettre le capteur dans son emplacement



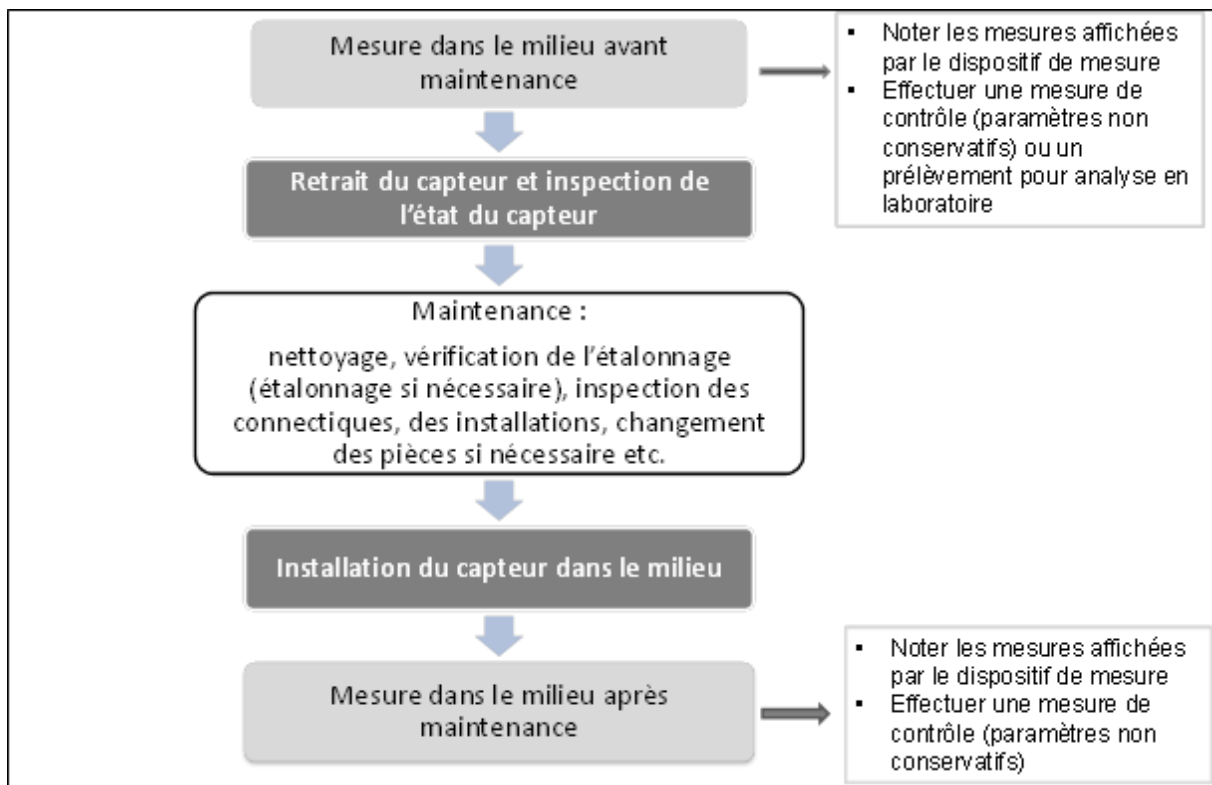
- Noter les valeurs mesurées par le dispositif de mesure, la date et l'heure et les conditions environnementales ainsi que toute information pertinente
- Réaliser une mesure au moyen d'un appareil portable étalonné pour les paramètres non conservatifs

Pour réaliser cette procédure, il est nécessaire de définir les méthodes de référence qui permettront de comparer les mesures réalisées par le dispositif de mesure et celles réalisées avec la méthode de référence.

Il existe plusieurs types de méthodes de référence :

- Appareil portable pour les mesures non conservatives (pH, température, conductivité, oxygène dissous, turbidité, chlore)
- Méthode de laboratoire.

La Figure 14 illustre les étapes principales de cette procédure pour les paramètres non conservatifs comme le pH, la température, la conductivité, l'oxygène dissous, la turbidité, le chlore etc.



**Figure 14 : Principe général d'une procédure type de maintenance**

Dans certains cas, notamment en conditions extrêmes ou dangereuses, la maintenance ne peut être réalisée correctement. Il peut être alors pertinent de disposer de capteurs de rechange, pré-étalonnés, et de remplacer les capteurs existants par ceux-ci.

Tous les appareils portables utilisés lors des maintenances doivent être vérifiés, et étalonnés si nécessaire, avant toute maintenance. Un suivi métrologique de ces appareils doit être assuré.

Pour les méthodes de laboratoire, il est nécessaire de réaliser un prélèvement. Un plan d'échantillonnage doit être rédigé et disponible. Il doit contenir à minima le choix de la méthode de référence et ses performances, les méthodes d'échantillonnage et les contrôles qualités appropriés (par exemple blancs, doubles échantillons, échantillons dopés, en se référant à la norme FD T90-524 pour les protocoles).

Les mesures avec les appareils portables et/ou le prélèvement doivent être effectués à l'endroit physique où le capteur ou la crépine de la pompe du dispositif de mesure en continu est immergé(e) selon la configuration de la station. La mesure affichée par le dispositif de mesure doit être notée au même moment que la mesure avec les appareils portables et/ou du prélèvement est réalisée.

Par ailleurs, lors des maintenances, il est nécessaire de vérifier l'état de fonctionnement des capteurs et des connectiques (pour identifier tout signe de corrosion par exemple), l'état de fonctionnement des pompes, l'encrassement des tubes crépinés ou du récipient dans lequel les mesures sont réalisées selon la configuration de la station.

Un exemple de résultats obtenus lors d'une maintenance pour les mesures de température, pH et conductivité à la fois dans le milieu et lors de la vérification de l'étalonnage dans des solutions étalon est illustré dans le Tableau 5 et le Tableau 6 respectivement.

Pour la température, aucune dérive n'a eu lieu et l'écart entre la mesure réalisée par le dispositif de mesure en continu et le contrôle qualité (CQ) est inférieur ou égale à 0,2 °C.

Pour la conductivité à 25°C, le capteur était clairement encrassé et un simple nettoyage a permis de résoudre le décalage observé avant maintenance à la fois dans le milieu et dans les solutions étalons. L'écart entre la mesure réalisée par le dispositif de mesure en continu et le contrôle qualité après nettoyage est inférieur à 3%.

Enfin, pour le pH, le nettoyage simple du capteur n'est pas suffisant, que ce soit pour les mesures réalisées dans le milieu ou dans des solutions étalon, et une maintenance de l'électrode de référence a été nécessaire pour retrouver des valeurs cohérentes avec un écart inférieur à 0,2.

**Tableau 5 : Exemple de résultats obtenus lors d'une maintenance de capteurs de pH et de conductivité**

| Paramètres (Unité)           | Avant nettoyage                              |                      | Après nettoyage                              |                      | Après maintenance                            |                      |
|------------------------------|----------------------------------------------|----------------------|----------------------------------------------|----------------------|----------------------------------------------|----------------------|
|                              | Contrôle Qualité externe (Appareil portable) | Dispositif de mesure | Contrôle Qualité externe (Appareil portable) | Dispositif de mesure | Contrôle Qualité externe (Appareil portable) | Dispositif de mesure |
| T (°C)                       | 14,0                                         | 14,2                 | 14,1                                         | 13,9                 | 14,3                                         | 14,4                 |
| pH (unité pH)                | 7,66                                         | 10,3                 | 7,72                                         | 10,07                | 7,83                                         | 7,96                 |
| Conductivité à 25 °C (µS/cm) | 552                                          | 368                  | 555                                          | 542                  | 556                                          | 541                  |

**Tableau 6 : Exemple de résultats obtenus lors de la vérification de l'étalonnage pendant une maintenance de capteurs de pH et de conductivité**

| Paramètres (Unités)          | Avant nettoyage |                      | Après nettoyage |                      | Après maintenance |                      |
|------------------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-------------------|----------------------|
|                              | Valeur cible    | Dispositif de mesure | Valeur cible    | Dispositif de mesure | Valeur cible      | Dispositif de mesure |
| pH (unité pH)                | 7,04            | 9,46                 | 7,04            | 9,51                 | 7,04              | 6,96                 |
|                              | 10,13           | 12,2                 | 10,13           | 12,4                 | 10,13             | 10,12                |
| Conductivité à 25 °C (µS/cm) | 0               | 0                    | 0               | 0                    | 0                 | 0                    |
|                              | 1408            | 1002                 | 1408            | 1420                 | 1408              | 1412                 |

### 6.2.2 FREQUENCE DE MAINTENANCE

La fréquence de la maintenance doit être adaptée aux dérives observées. En effet, l'objectif premier de la maintenance est de limiter l'impact notamment de l'encrassement bactérien des capteurs, ou biofouling, qui peut engendrer des dérives parfois importantes.

La fréquence de la maintenance peut être optimisée lors de l'essai de pré-validation. Cependant, il faut garder à l'esprit, que l'encrassement bactérien dépend de plusieurs facteurs, comme les conditions hydrologiques et la température, mais aussi la nature des capteurs plus ou moins sensibles à l'encrassement. Ainsi, les capteurs de température, de conductivité et de turbidité (équipés de balais autonettoyants) sont peu sensibles à l'encrassement. Par contre les électrodes pH et les électrodes sélectives sont particulièrement sensibles à l'encrassement.

Il est tout à fait possible de définir des fréquences de maintenance différentes selon la nature des capteurs et selon la période de l'année.

Les mesures réalisées lors des maintenances et notamment les valeurs avant et après maintenance permettent d'estimer l'amplitude des dérives et aussi par la même occasion valider la fréquence de maintenance ou de la modifier afin de maîtriser les dérives des capteurs.

### 6.2.3 RECUPERATION DES DONNEES

Si la station de mesure est équipée d'un système de transmission des données en temps réel vers un serveur par exemple, une vérification des données et l'état des capteurs peuvent être réalisés à distance. Ceci permet notamment de déclencher une maintenance si une anomalie est détectée.

Si la transmission des données n'est pas automatique, alors il est nécessaire de télécharger les données du dispositif de mesure lors de chaque maintenance.

### 6.2.4 CONTROLES QUALITE

Il est impératif de mettre en place des contrôles qualité (par exemple blanc, eau / échantillon dopé(e), solution étalon etc.), afin de s'assurer que le dispositif de mesure en continu fonctionne correctement. Ces contrôles qualité permettent aussi d'effectuer un traitement a posteriori des données pour tenir compte des dérives observées ou d'artéfacts identifiés (voir § 6.3).

Des cartes de contrôle des écarts, entre la valeur mesurée par le dispositif de mesure et la valeur obtenue par la méthode de référence avant maintenance, peuvent être construites, afin d'identifier toute dérive inhabituelle et mettre en place des actions correctives (par exemple augmentation de la fréquence de maintenance). Un exemple de carte de contrôle construite à partir de données sur un capteur pH est présenté dans Figure 15. Les bornes de contrôle (1 s) et d'alarme (2 s) sont définies à partir de l'écart-type (s) sur l'ensemble des 47 données disponibles.

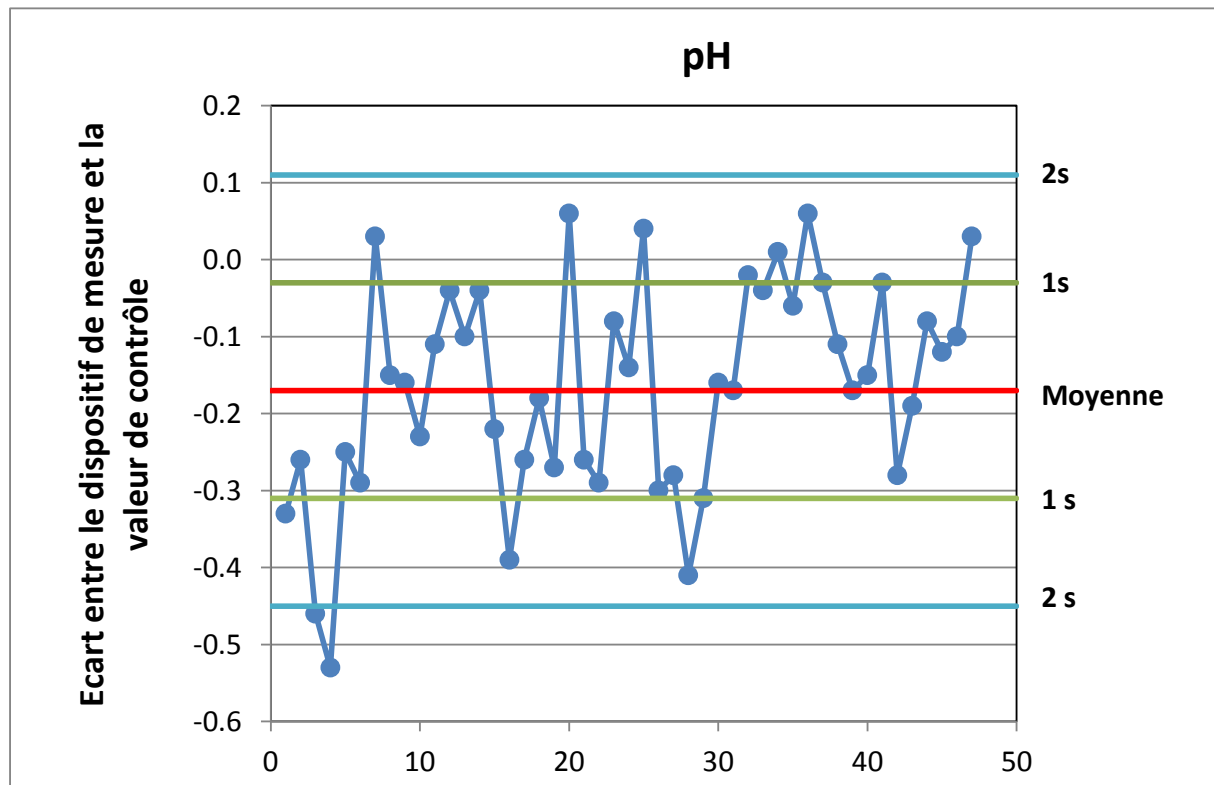


Figure 15 : Exemple d'une carte de contrôle pour le pH mesuré dans le milieu avant la maintenance (s : écart type)

### **6.2.5 REACTIFS ET GESTION DES STOCKS**

Certains dispositifs de mesure en continu utilisent des réactifs chimiques.

Il est important de bien noter sur chaque flacon de réactif, la date d'ouverture ou de mise en service dans le dispositif de mesure ainsi que la date limite d'utilisation. En effet, certains réactifs, comme l'acide ascorbique, ont une durée de vie assez courte et il est nécessaire de remplacer ces réactifs avant la fin de leur durée de vie afin de ne pas impacter la justesse des mesures réalisées.

Il est impératif de ne jamais mélanger un réactif ancien avec un réactif nouvellement préparé ou ouvert, au risque d'avoir des décalages importants dans les données.

Si la préparation des réactifs est réalisée par l'opérateur, un mode opératoire doit être disponible et toutes les opérations, ainsi que les produits chimiques utilisés avec leur niveau de pureté, doivent être consignées sur un support adapté (par exemple un cahier dédié).

La gestion des stocks de réactifs doit tenir compte de la consommation par les dispositifs de mesure en continu ainsi que des dates de péremptions afin de ne pas gaspiller de réactif tout en assurant un approvisionnement permanent.

De même il est préférable d'avoir en stock des pièces de rechange en cas de panne.

### **6.2.6 MAINTENANCE PREVENTIVE (INSTRUCTION FABRICANT)**

Les fabricants de dispositifs de mesure peuvent recommander une maintenance préventive à réaliser périodiquement, notamment le changement de certaines pièces (tuyaux de pompe etc.).

Il est toujours préférable d'anticiper la panne que de prendre le risque de perdre des données lors de la survenue de panne qui aurait pu être évitée.

### **6.2.7 PROBLEMES COURAMMENT RENCONTRES**

Les pertes de données peuvent avoir plusieurs origines. L'USGS recommande de disposer d'une procédure mentionnant les problèmes les plus souvent rencontrés par capteur, ainsi que les moyens pour les résoudre (USGS, 2006).

Les symptômes peuvent être :

- des données erratiques
- un temps de stabilisation très long
- une impossibilité d'étalonner l'appareil

Les recommandations correspondantes sont alors :

- le nettoyage du capteur
- la vérification des connectiques
- l'utilisation de solutions étalons neuves
- le changement de capteur

- l'élimination des bulles d'air sur les capteurs (turbidité)

Dans le cadre de l'étude réalisée par Aquaref sur l'évaluation des performances de dispositifs de mesure en continu des nutriments et de la matière organique en cours d'eau (Guigues et al. 2016) les principales causes rencontrées de perte de données ont été les suivantes :

- problème de récupération des données (par exemple mauvais enclenchement de la clé USB dans son support) ;
- logiciel figé (probablement en lien avec l'alimentation électrique) ;
- quantité de réactifs insuffisante ;
- bouchage des capillaires par les colloïdes et matières en suspension ;
- pannes diverses (pompe, membrane d'électrode sélective percée, dysfonctionnement de l'autonettoyage ...) ;
- approvisionnement de réactifs en provenance des Etats Unis (douanes) ;
- reconnexion non immédiate des sondes au système d'acquisition.

### **6.3 POST-TRAITEMENT DES DONNEES**

#### **6.3.1 ANALYSE DES DONNEES**

L'analyse des données enregistrées se décompose en plusieurs étapes :

- Evaluation initiale
- Identification et élimination des données aberrantes
- Corrections des dérives si nécessaire
- Evaluation finale

Il est important de réaliser les premières étapes immédiatement après la maintenance, afin de pouvoir réagir rapidement en cas de problème identifié.

Lors de l'analyse des données, il peut être utile et quand c'est possible, à la fois de comparer les mesures des différents paramètres mesurés simultanément et de comparer les données de plusieurs stations sur le même bassin versant afin d'identifier toute anomalie.

Un exemple d'identification à distance d'un artefact est illustré dans la Figure 16. L'analyse hebdomadaire des données a pu mettre en évidence une chute anormale de la conductivité, non seulement par comparaison avec les mesures de conductivité sur d'autres stations du même bassin versant, mais aussi avec les mesures d'autres paramètres comme le débit ou la température. Un technicien envoyé sur site a pu identifier l'origine du décalage en conductivité : un ver d'eau était installé dans la sonde de conductivité entre les électrodes.

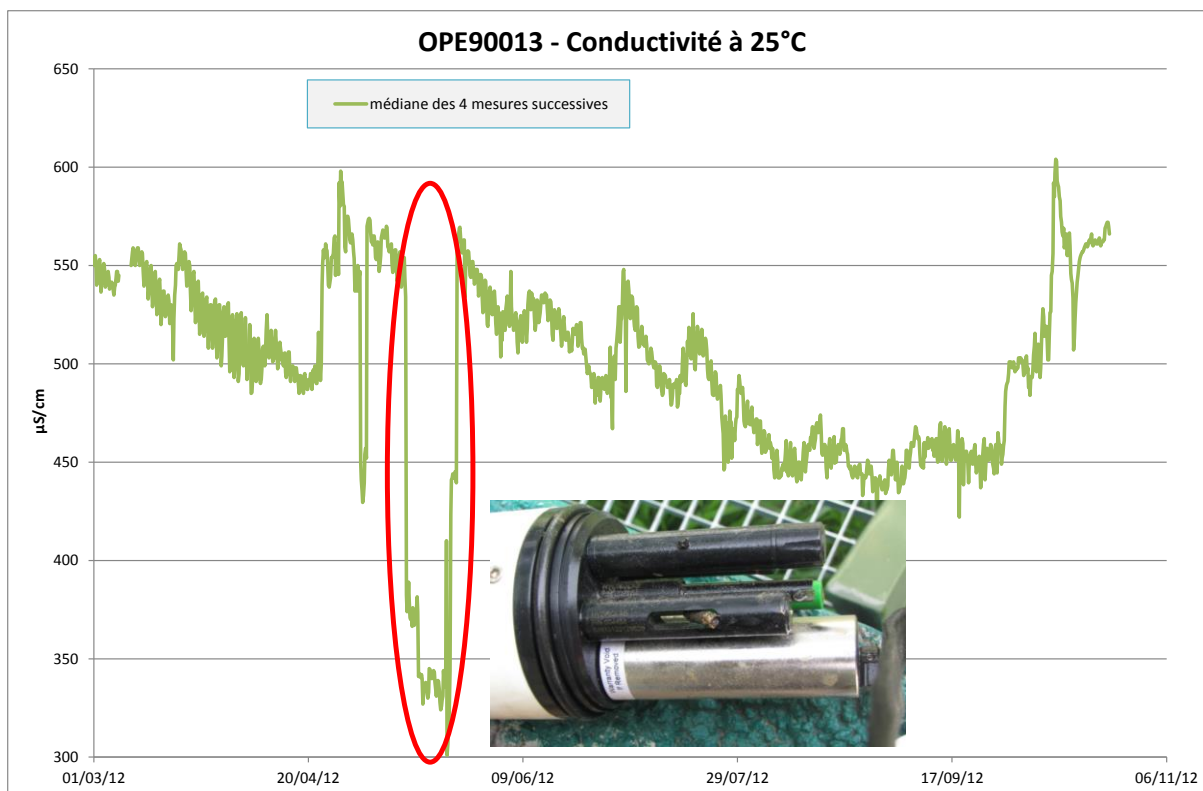


Figure 16 : Exemple d'artéfact dû à la présence d'un ver d'eau dans la cellule de conductivité

### 6.3.2 CORRECTION DES DERIVES

En général, les mêmes critères pour la correction de données et pour la vérification de l'étalonnage sont définis. En effet, au-delà des limites définies par ces critères, les mesures ont dérivé de manière significative et doivent être post-traitées quand cela est possible.

Si l'exemple du paragraphe 6.2.1 est repris (Tableau 5), alors il apparaît que pour la température aucun post-traitement des données n'est nécessaire, par contre pour la conductivité et le pH un post traitement des données doit être réalisé pour corriger des dérives observées.

L'USGS (2006) recommande de corriger des dérives dues au biofouling et/ou des dérives de l'étalonnage, quand la somme des valeurs absolues des erreurs liées à ces deux dérives est supérieure à une valeur définie (Tableau 4). La correction à appliquer peut être une correction à 1 point (en valeur absolue - modèle additif) ou à deux points (en pourcentage - modèle multiplicatif). Typiquement, l'USGS a observé que les corrections pour l'oxygène dissous, la turbidité et le pH sont des corrections à 1 point, alors que celle pour la conductivité est une correction à 2 points.

La correction à 1 point est détaillée ci-après au travers d'un exemple. Elle est basée sur l'estimation des écarts entre les mesures obtenues par le dispositif de mesure en continu et par les mesures de contrôle réalisés lors des maintenances.

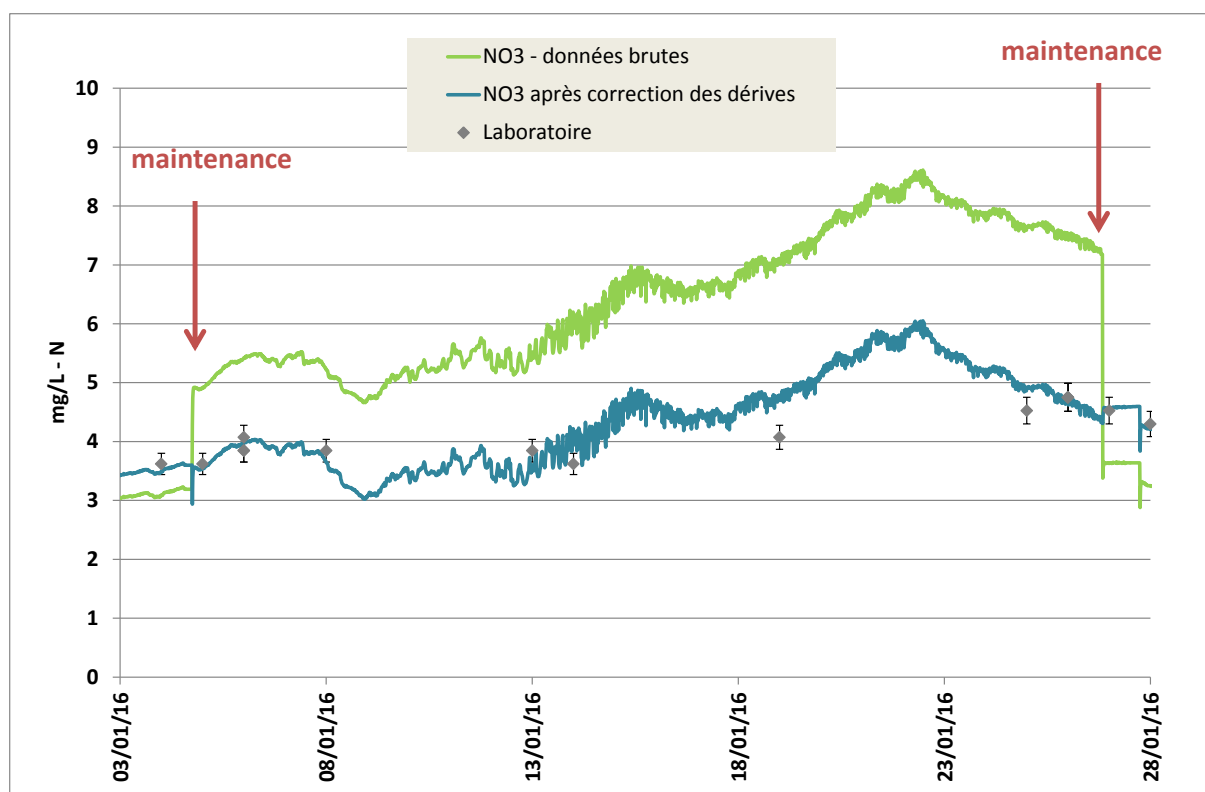


Figure 17 : Exemple de correction de la dérive d'un dispositif de mesure en continu des nitrates sur la période du 4/01/16 au 27/01/16

| Date                                | 4/01/16<br>(après<br>maintenance) | 27/01/16<br>(avant<br>maintenance) |
|-------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| Valeur du contrôle qualité (mg/L N) | 3,6                               | 4,5                                |
| Valeur de la sonde in situ (mg/L N) | 4,9                               | 7,3                                |
| Ecart observé (mg/L N)              | 1,3                               | 2,8                                |

Tableau 7 : Données utilisées pour corriger de la dérive observée pour un dispositif de mesure en continu des nitrates sur la période du 4/01/16 au 27/01/16

L'équation de la droite utilisée pour corriger les données est la suivante du dispositif de mesure en continu des nitrates :

Concentration en nitrates corrigée = concentration mesurée + (a . date + b)  
Avec a = 0,06818 et b = -2887,77

Trois exemples sont présentés ci-après afin d'illustrer l'importance de la correction des dérives instrumentales et dues à l'encrassement bactérien.

#### Exemple 1 : Evaluation des performances des dispositifs de mesure en continu pour le suivi des nutriments et de la matière organique dans les cours d'eau - Etude Aquaref 2013-2015 (Guigues et al. 2016)

Des dérives entre deux campagnes de mesure ont été observées pour une sonde multiparamètre mesurant les nitrates au moyen d'une électrode sélective. Ces dérives sont principalement dues à l'encrassement de la jonction de l'électrode de référence par les particules et/ou les bactéries qui peuvent se développer sur des



surfaces immergées pendant plusieurs semaines. Il est difficile d'éviter ces dérives qui sont influencées par différents facteurs environnementaux. Cependant il est tout de même possible de corriger les données pour tenir compte des dérives observées en utilisant les valeurs mesurées dans les échantillons prélevés au moment de la maintenance et de l'étalonnage de la sonde, en appliquant la méthode proposée par l'USGS (2006) (Figure 18).

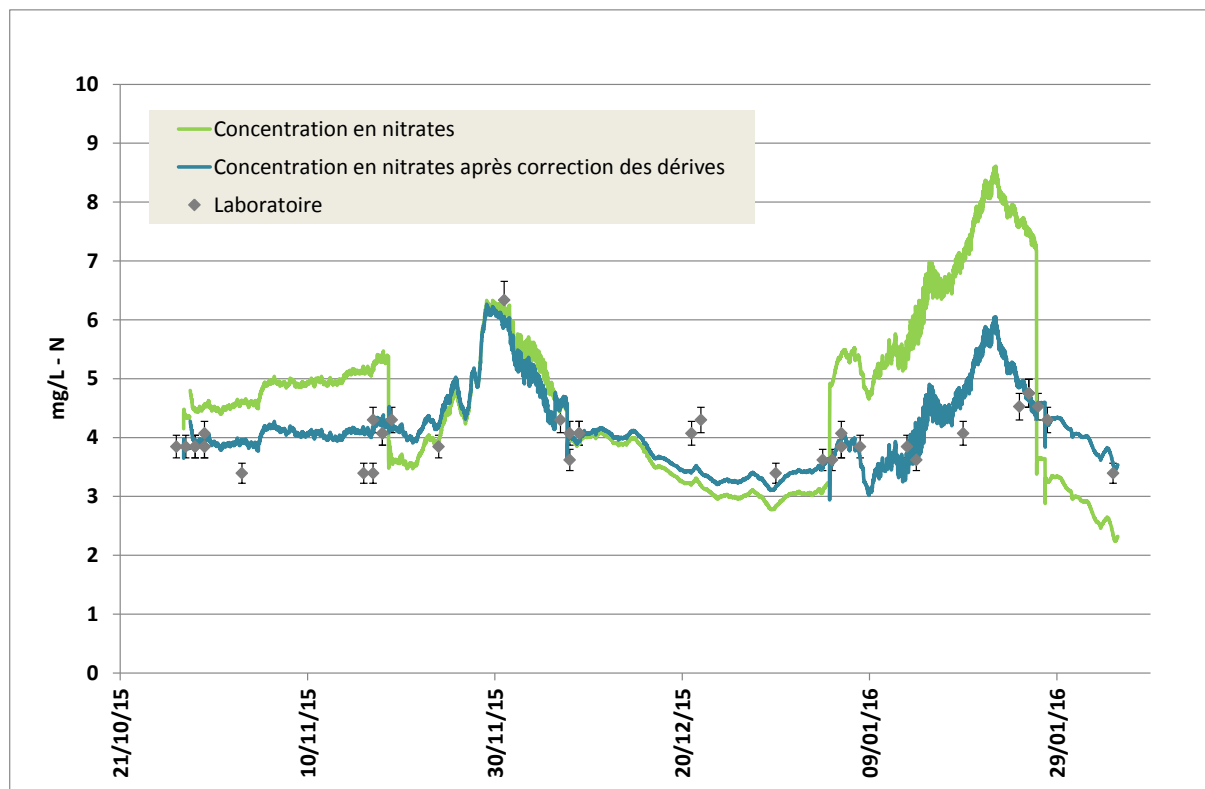


Figure 18 : Mesures en nitrates, sans et avec correction des dérives (d'après Guigues et al., 2016)

### Exemple 2 : Stations instrumentées sur les cours d'eau de la zone OPE - Andra (Guigues 2014)

5 stations instrumentées ont été installées en 2012 sur les cours d'eau pérennes de l'Observatoire pérenne de l'Environnement en Meuse de l'Andra. Des sondes multiparamètres permettent de mesurer en continu la température, le pH, les chlorures, la conductivité, l'oxygène dissous et la turbidité.

Une correction de la dérive du pH est réalisée en considérant les écarts entre la médiane des mesures consécutives des sondes et la valeur du contrôle qualité. A partir de ces écarts, une interpolation linéaire en appliquant un modèle additif (en hautes eaux) ou multiplicatif (en basses eaux) a été utilisée pour les données acquises en 2014 (Figure 19).

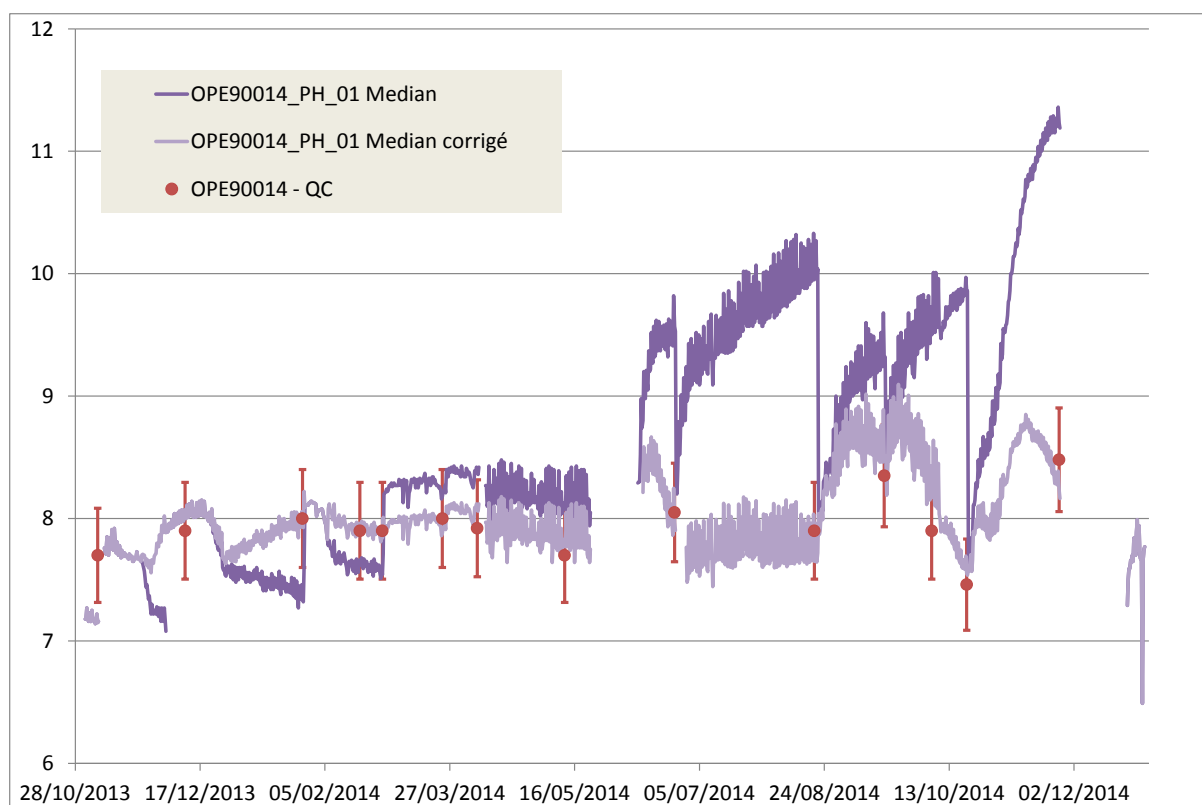


Figure 19 : Mesure de pH, sans et avec correction des dérives (Guigues, 2014)

### Exemple 3 : Stations instrumentées sur les cours d'eau de la zone OPE - Andra (Guigues 2017)

L'exemple d'un problème survenu lors de l'étalonnage d'un capteur de conductivité lors des maintenances sur site des stations instrumentées sur l'OPE, du fait des conditions de température trop froide, a engendré un écart de 90  $\mu\text{S}/\text{cm}$  environ pendant 3 mois. Cet écart a été corrigé en étalonnant le capteur en avril 2016 (la vérification est trimestrielle pour ce capteur) et les données ont alors été corrigées en tenant compte des valeurs avant et après étalonnage (Figure 20).

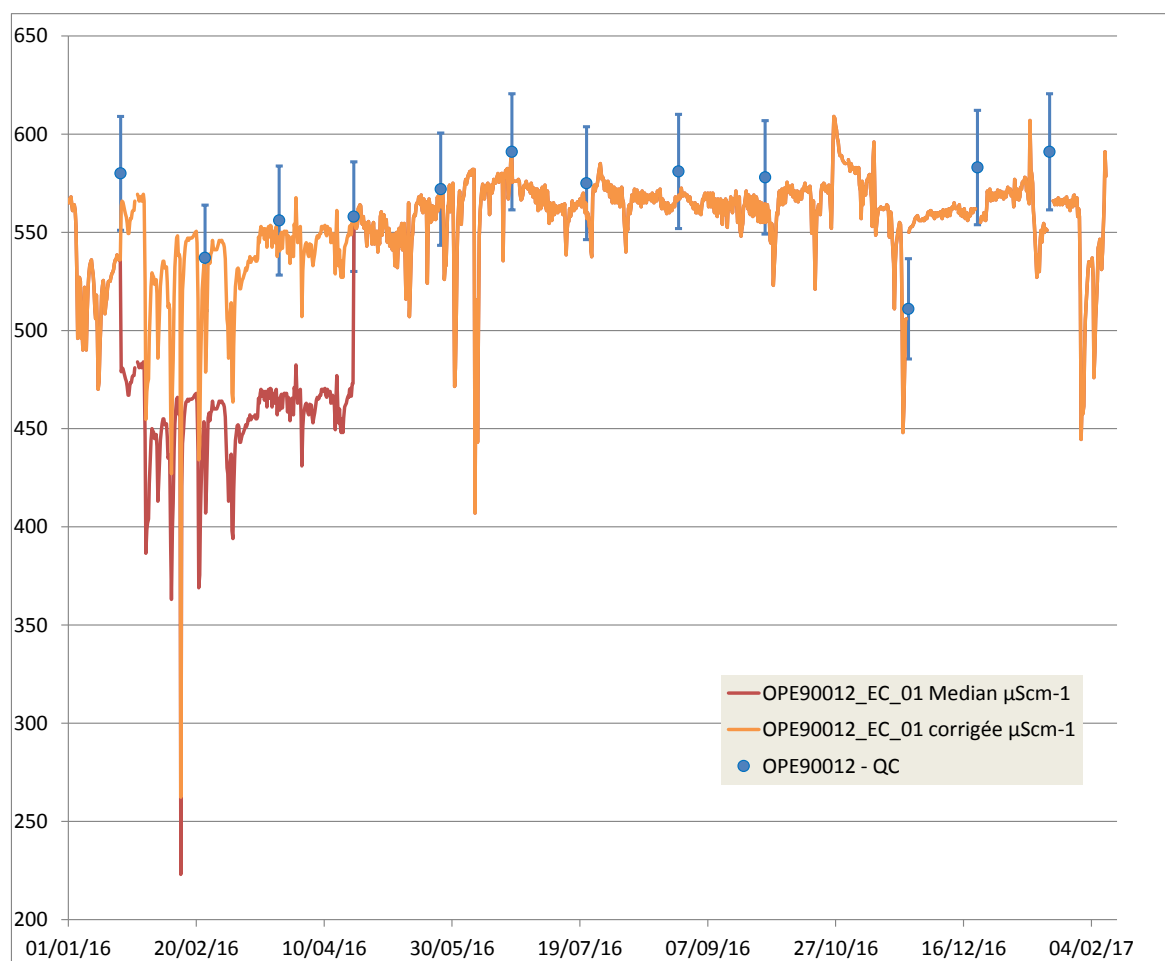


Figure 20 : Mesure de la conductivité à 25°C, avant et après correction, d'après (Guigues, 2017)

### 6.3.3 INDICE DE QUALITE

Une fois les données corrigées des dérives survenues, il est possible de définir un indice de qualité associé à la donnée et reflétant l'impact de la dérive sur la qualité de la donnée. Ainsi, plus la dérive a été importante en amplitude, plus les données auront un indice de qualité mauvais. L'USGS a proposé 4 niveaux de gammes d'écarts entre la mesure non corrigée et la mesure corrigée pour les paramètres non conservatifs (Tableau 8) afin de qualifier les données acquises par les dispositifs de mesure en continu.

Tableau 8 : Seuils associés à chaque indice de qualité pour les paramètres non conservatifs, d'après USGS 2006

| Paramètre                   | Indice de qualité |                           |                           |                 |
|-----------------------------|-------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------|
|                             | 1 - très bon      | 2 - bon                   | 3 - moyen                 | 4 - mauvais     |
| Température (°C)            | ≤ 0.2             | 0.2 - 0.5                 | 0.5 - 0.8                 | > 0.8           |
| Conductivité à 25°C (μS/cm) | ≤ 3%              | 3% - 10%                  | 10% - 15%                 | > 15%           |
| Oxygène dissous (mg/L)      | ≤ 0.3<br>ou 5%    | 0.3 - 0.5<br>ou 5% - 10 % | 0.5 - 0.8<br>ou 10% - 15% | > 0.8<br>ou 15% |
| pH                          | ≤ 0.2             | 0.2 - 0.5                 | 0.5 - 0.8                 | > 0.8           |
| Turbidité (NFU/NTU)         | ≤ 0.5<br>ou 5%    | 0.5 - 1<br>ou 5% - 10%    | 1 - 1.5<br>ou 10% - 15%   | > 1.5<br>ou 15% |

#### 6.4 TRAÇABILITE DOCUMENTAIRE

Toutes les informations sur les vérifications d'étalonnage et les maintenances réalisées doivent être consignées. Cela concerne aussi les observations sur l'état des capteurs et des connectiques. Une fiche terrain peut servir de support pour enregistrer les informations nécessaires et éviter toute omission qui pourrait s'avérer importante par la suite. Un exemple de fiche est donné en Annexe I.

Idéalement, chaque dispositif de mesure doit aussi avoir son propre support ou cahier de suivi métrologique où sont consignées toutes les opérations d'étalonnage et de maintenance du dispositif (fiche de vie).

Un exemple de processus concernant les types d'information et les supports et conditions de stockage de ces informations qui a été mis en place lors de l'essai Aquaref sur l'évaluation des performances des dispositifs de mesure en continu pour le suivi des nutriments et de la matière organique dans les cours d'eau, est présenté dans le Tableau 9.

**Tableau 9 : Synthèse des types de données, des supports et des fréquences des données à enregistrer et stocker – Exemple de l'étude Aquaref (Guigues et al. 2016)**

| Données à enregistrer                                   | Support local d'enregistrement                                                                                                          | Fréquence d'enregistrement sur support local                                                                             | Fréquence d'enregistrement sur support centralisé | Objectif                                                                                          |
|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dates et heures des prélèvements                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>Cahier labo</li> <li>Fiche modèle sur PC</li> </ul>                                              | A chaque prélèvement                                                                                                     | A la fin de la campagne                           | Traçabilité documentaire des prélèvements                                                         |
| Mesure de référence laboratoire                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>Cahier labo</li> <li>Fiche modèle sur PC</li> </ul>                                              |                                                                                                                          | A réception des résultats                         | Evaluation du biais en conditions réelles                                                         |
| Paramètres environnementaux (météo, débit, T etc.)      | <ul style="list-style-type: none"> <li>Cahier labo</li> <li>Fiche modèle sur PC</li> </ul>                                              | Chaque jour (+ si événement exceptionnel) - enregistrement via les sondes multiparamètres, site vigicrue (hauteur d'eau) | A la fin de la campagne                           | Traçabilité des conditions de prélèvements<br>Définition des caractéristiques du site             |
| Données de vérification des étalonnages                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>Fichiers de données des dispositifs</li> <li>Cahier labo</li> <li>Fiche modèle sur PC</li> </ul> | A chaque campagne                                                                                                        | A la fin de la campagne                           | Evaluation du biais, de la fidélité et de la linéarité sur solutions étalon et échantillons dopés |
| Encrassement - Photos                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Appareil photo</li> <li>Répertoire dédié sur PC</li> </ul>                                       | A chaque campagne                                                                                                        | A la fin de la campagne                           | visualiser l'encrassement des capteurs dans le temps                                              |
| Données de mesure en continu des différents dispositifs | <ul style="list-style-type: none"> <li>Fichiers de données des dispositifs</li> </ul>                                                   | A chaque fin de campagne<br>A la fin de l'essai                                                                          | A la fin de la campagne<br>A la fin de l'essai    | Comportement des dispositifs sur 3 mois                                                           |

Par ailleurs, lors des maintenances, il est nécessaire de disposer des documents suivants : procédure de maintenance, procédure d'échantillonnage pour les points de contrôle, manuels des différents dispositifs de mesure.

Enfin, un bilan, typiquement annuel, doit être réalisé et doit inclure :

- un historique des maintenances
- les données des points de contrôle obtenus au moyen de la méthode de référence
- les corrections de données réalisées
- les problèmes rencontrés et les moyens mis en œuvre pour les résoudre
- le taux de fonctionnement des capteurs

## **7. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

Bende-Michl U., Hairsine P.B. (2010) A systematic approach to choosing an automated nutrient analyser for river monitoring. *J. Env. Monit.*, 2012, 12, 127-134

Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2009) Guidance Document No.19: Guidance on surface water chemical monitoring under the Water Framework Directive

Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau

FD T90-524 (2015) Qualité de l'eau - Contrôle qualité – Contrôle qualité pour l'échantillonnage et la conservation des eaux

Gantois F., Guigues N., Lepot B. et Gal F. (2016) Panorama de l'existant sur les capteurs et analyseurs en ligne pour la mesure des paramètres physico-chimiques dans l'eau, rapport Aquaref

GEMCEA (2009) Etude du comportement d'un ruisseau peri urbain (Gremillon), diagnostic et propositions d'aménagement, rapport final

Guigues N. (2010) - Définition et expertise du réseau d'observation des eaux et des sédiments de la zone de l'Observatoire Pérenne de l'Environnement. Partie II : Projet de stations instrumentées de mesure de la qualité des eaux superficielles, rapport LNE

Guigues N. (2014) - Stations Instrumentées de suivi de la qualité de l'eau sur la zone OPE. Note 2 : Bilan sur le fonctionnement des stations de novembre 2013 à décembre 2014, rapport LNE.

Guigues (2017) - Stations Instrumentées de suivi de la qualité de l'eau sur la zone OPE. Note 1 : Bilan sur le fonctionnement des stations de janvier 2016 à février 2017, rapport LNE.

Guigues N. et Cabillic J. (2013) Comment choisir un dispositif de mesure en continu, Note Aquaref

Guigues N., Lepot B., Cabillic J., Raveau S., Ferret C., Marescaut N. (2016) Evaluation de performance de dispositifs de mesure en continu pour la surveillance des nutriments et de la matière organique dans les eaux de surface, rapport Aquaref

ISO 5667-4 (2016) Water quality — Sampling — Part 4: Guidance on sampling from lakes, natural and man-made

NF EN ISO 10523 (2012) Qualité de l'eau - Détermination du pH

NF EN ISO 5667-1 (2007) Qualité de l'eau - Échantillonnage - Partie 1 : Lignes directrices pour la conception des programmes et des techniques d'échantillonnage

NF EN ISO 5667-3 (2013) Qualité de l'eau — Échantillonnage — Partie 3 : Conservation et manipulation des échantillons d'eau

NF EN ISO 5667-14 (2017) Qualité de l'eau - Échantillonnage - Partie 14 : lignes directrices sur l'assurance qualité et le contrôle qualité pour l'échantillonnage et la manutention des eaux environnementales

NF EN ISO 5667-6 (2016) Qualité de l'eau - Échantillonnage - Partie 6 : lignes directrices pour l'échantillonnage des rivières et des cours d'eau

NF EN ISO 7027-1 (2016) Qualité de l'eau - Détermination de la turbidité - Partie 1 : Méthodes quantitatives

NF T90-552 (2004) Qualité de l'eau - Mesure en continu pour l'eau - Spécifications pour l'étude, la mise en oeuvre et l'exploitation

PrFD T90-523-1 (2017) Qualité de l'eau - Guide d'échantillonnage pour le suivi de la qualité des eaux dans l'environnement - Partie 1 : Échantillonnage d'eau en rivières et canaux

PrEN 17075 (2017) Qualité de l'eau - Exigences générales et modes opératoires d'essai de performances pour les équipements de surveillance de l'eau - Dispositifs de mesure

USGS (2006) Guidelines and Standard Procedures for Continuous Water-Quality Monitors: Station Operation, Record Computation, and Data Reporting

VIM (2012) JCGM 200 - International vocabulary of metrology - Basic and general concepts and associated terms, 3rd edition

**8. ANNEXE I : EXEMPLES DE FICHES POUR LA MAINTENANCE DES CAPTEURS**

|                                               |                                |                           |                           |       |          |
|-----------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------|---------------------------|-------|----------|
| Code de la station :                          | Nom de la station :            |                           | Cours d'eau :             |       |          |
|                                               |                                |                           | Niveau d'eau :            |       |          |
| Intervenant :                                 | Date :                         | Heure début :             | Heure de fin :            |       |          |
| Conditions météo :                            | Ensoleillé<br>Clair<br>Nuageux | Orageux<br>Pluie<br>Neige | Gel<br>Brouillard<br>Vent |       |          |
| Présence de<br>biofouling sur les<br>capteurs | pH                             | non                       | un peu                    | moyen | beaucoup |
|                                               | Conductivité                   | non                       | un peu                    | moyen | beaucoup |
|                                               | Oxygène dissous                | non                       | un peu                    | moyen | beaucoup |
|                                               | Turbidité                      | non                       | un peu                    | moyen | beaucoup |
|                                               | Température                    | non                       | un peu                    | moyen | beaucoup |
|                                               | .....                          | non                       | un peu                    | moyen | beaucoup |
|                                               | .....                          | non                       | un peu                    | moyen | beaucoup |
|                                               |                                | non                       | un peu                    | moyen | beaucoup |

**Fiche 1 : Description de la station et des conditions environnementales**

Station :

Date :

| Opération de maintenance et d'étalonnage          | Fréquence | Fait |
|---------------------------------------------------|-----------|------|
| Nettoyage à l'eau des sondes                      | 1 semaine |      |
| Nettoyage des bacs et récipients de mesure        | 1 semaine |      |
|                                                   |           |      |
| Maintenance de l'électrode de référence (pH)      | 1 mois    |      |
| Vérification de l'étalonnage du pH                | 1 semaine |      |
| Vérification de l'étalonnage de l'oxygène dissous | 1 mois    |      |
| Vérification de l'étalonnage de la conductivité   | 3 mois    |      |
| Vérification de l'étalonnage de la turbidité      | 3 mois    |      |
| Electrode de référence : changement du fritté     | 6 mois    |      |
| Changement de l'embout oxygène dissous            | 12 mois   |      |
| Changement de l'électrode pH                      | 12 mois   |      |
|                                                   |           |      |
| Changement des réactifs                           | 1 mois    |      |
| Changement des tuyaux de pompe des analyseurs     | 3 mois    |      |
| Maintenance sur la pompe de prélèvement           | 6 mois    |      |
|                                                   |           |      |

Fiche 2 : Exemple de récapitulatif de la maintenance réalisée



Station :

Date :

| Vérification du pH |                     |                                     |                                        | Critère d'étalonnage (après maintenance) : $\pm 0.1$ unité |                                                           |                                    |                                                           |      |
|--------------------|---------------------|-------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------|
| Etalon             | Référence<br>N° Lot | Température<br>de l'étalon<br>(T°C) | Valeur<br>théorique de<br>l'étalon à T | Valeur lue<br>avant<br>maintenance                         | Ecart entre<br>la valeur lue<br>et la valeur<br>théorique | Valeur lue<br>après<br>maintenance | Ecart entre<br>la valeur lue<br>et la valeur<br>théorique | OK ? |
| 1                  |                     |                                     |                                        |                                                            |                                                           |                                    |                                                           |      |
| 2                  |                     |                                     |                                        |                                                            |                                                           |                                    |                                                           |      |

Fiche 3 : Vérification du pH

| Etalonnage du pH (après maintenance) |                     |                            |                                     | Critère de vérification : $\pm 0.1$ unité pH |                              |
|--------------------------------------|---------------------|----------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------|
| Etalon                               | Référence<br>N° Lot | Température<br>de l'étalon | Valeur théorique de<br>l'étalon à T | Valeur lue avant<br>ajustage                 | Valeur lue<br>après ajustage |
| 1                                    |                     |                            |                                     |                                              |                              |
| 2                                    |                     |                            |                                     |                                              |                              |
| 3<br>(vérification)                  |                     |                            |                                     |                                              |                              |

Fiche 4 : Etalonnage du pH

Station :

Date :

| Vérification de la conductivité |                          |                            |                                              | Critère d'étalonnage (après maintenance): $\pm 5 \mu\text{S/cm}$ ou 3% |                                                           |                             |                                                           |      |
|---------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------------------|------|
| Etalon                          | Référence<br>N° Lot      | Température<br>de l'étalon | Valeur<br>théorique<br>de<br>l'étalon à<br>T | Valeur lue<br>avant<br>maintenance                                     | Ecart entre<br>la valeur lue<br>et la valeur<br>théorique | Valeur après<br>maintenance | Ecart entre<br>la valeur lue<br>et la valeur<br>théorique | OK ? |
| 1                               | 0 $\mu\text{S/cm}$ (air) |                            | 0                                            |                                                                        |                                                           |                             |                                                           |      |
| 2                               |                          |                            |                                              |                                                                        |                                                           |                             |                                                           |      |

Fiche 5 : Vérification de la conductivité

| Etalonnage de la conductivité (après maintenance) |                                  |                            | Critère de vérification : $\pm 5 \mu\text{S/cm}$ ou 3% |                              |                              |
|---------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Etalon                                            | Référence<br>N° Lot              | Température<br>de l'étalon | Valeur<br>théorique de<br>l'étalon à T                 | Valeur lue<br>avant ajustage | Valeur lue après<br>ajustage |
| 1                                                 | 0 $\mu\text{S/cm}$ (air)         |                            |                                                        |                              |                              |
| 2                                                 | 1408 ou 1413<br>$\mu\text{S/cm}$ |                            |                                                        |                              |                              |
| 3<br>(vérification)                               |                                  |                            |                                                        |                              |                              |

Fiche 6 : Etalonnage de la conductivité

Station :

Date :

Mesures réalisées dans un échantillon réel (dans un bac ou dans un seau) ou in situ :

| Paramètres (Unités)            | Contrôle Qualité externe<br>(Appareil portable /<br>prélèvement pour analyse) | Value lue<br>avant nettoyage | Valeur lue<br>après maintenance et étalonnage | Contrôle Qualité externe<br>(Appareil portable / prélèvement<br>pour analyse) |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Heure                          |                                                                               |                              |                                               |                                                                               |
| T (°C)                         |                                                                               |                              |                                               |                                                                               |
| pH (unité pH)                  |                                                                               |                              |                                               |                                                                               |
| pH (mV)                        |                                                                               |                              |                                               |                                                                               |
| Conductivité (µS/cm)           |                                                                               |                              |                                               |                                                                               |
| Oxygène dissous (mg/L)         |                                                                               |                              |                                               |                                                                               |
| Saturation oxygène dissous (%) |                                                                               |                              |                                               |                                                                               |
| Turbidité (NTU)                |                                                                               |                              |                                               |                                                                               |
|                                |                                                                               |                              |                                               |                                                                               |
|                                |                                                                               |                              |                                               |                                                                               |
|                                |                                                                               |                              |                                               |                                                                               |

Fiche 7 : Synthèse des mesures réalisées lors de la maintenance des capteurs