



HAL
open science

La métrologie bas-coûts, ouverte, sobre et connectée : un changement de paradigme pour l'observation des hydrosystèmes ?

Ilane Cherif, O. Navratil, Frederic Cherqui, Philippe Namour, Jean-Luc Bertrand-Krajewski, Laëtitia Bacot, Frank Perret, N. Walcker, Latifa Fakri-Bouchet, Bastien Bourjaillat, et al.

► To cite this version:

Ilane Cherif, O. Navratil, Frederic Cherqui, Philippe Namour, Jean-Luc Bertrand-Krajewski, et al.. La métrologie bas-coûts, ouverte, sobre et connectée : un changement de paradigme pour l'observation des hydrosystèmes ?. TSM. Techniques Sciences Méthodes – Génie urbain, génie rural, 2024, 119 (3), pp.31-42. hal-04515209

HAL Id: hal-04515209

<https://hal.science/hal-04515209v1>

Submitted on 21 Mar 2024

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

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

La métrologie bas-coûts, ouverte, sobre et connectée : un changement de paradigme pour l'observation des hydrosystèmes ?

Environmental low-cost, open source, frugal and IoT sensors: a new paradigm for hydrosystems monitoring?

■ I. CHERIF^{1,2,5*}, O. NAVRATIL², F. CHERQUI^{1,3}, P. NAMOUR⁴, J.-L. BERTRAND-KRAJEWSKI¹, L. BACOT⁵, F. PERRET², N. WALCKER¹, L. FAKRI-BOUCHET^{6,7}, B. BOURJAILLAT², L. LORD², P. BEGUIN⁸

¹ Université de Lyon – INSA Lyon – Déchets Eaux Environnement Pollutions DEEP (EA 7429) – Villeurbanne

² UMR 5600 Environnement, Ville et Société – Université de Lyon – CNRS – Lyon

³ Université Claude Bernard Lyon 1 – Villeurbanne

⁴ Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE) Lyon-Grenoble Auvergne-Rhône-Alpes – UR RiverLy – Villeurbanne

⁵ Groupe de recherche Rhône-Alpes sur les infrastructures et l'eau (GRAIE) – Villeurbanne

⁶ Université Claude Bernard Lyon 1 – Institut des Sciences Analytiques (ISA) – UMR CNRS, 5280 – Villeurbanne

⁷ INSA Lyon – Villeurbanne

⁸ ÆGIR Ingénierie – Lyon

Mots-clés :

Capteurs
Eaux pluviales
Hauteur d'eau
Low-tech
Métrologie innovante,
Milieux aquatiques
Qualité de l'eau
Station météorologique
Suivi hydrologique
Transmission de données

RÉSUMÉ

Les hydrosystèmes sont des ensembles structurés, dynamiques et cohérents, qui nécessitent une métrologie adaptée pour mieux comprendre leur fonctionnement et les surveiller. Avec les méthodes et les outils de métrologie actuels, il est impossible de détecter la majeure partie des pics de pollution et des phénomènes hydro-météorologiques souvent localisés et très dynamiques. Ces processus impliquent une métrologie adaptée aux échelles spatiales et temporelles pertinentes vis-à-vis des processus physiques, chimiques et biologiques ciblés. Les réflexions proposées dans cet article s'appuient sur les travaux de recherche menés dans le cadre du projet « Cheap'Eau : solutions innovantes bas-coûts, libres et connectées pour le suivi des eaux pluviales », soutenu par l'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse et la fédération de recherche OTHU (Observatoire de terrain en hydrologie urbaine). L'objectif est de définir et de concevoir pour l'observation des hydrosystèmes : une métrologie « bas-coûts » et « sobre », les capteurs utilisés réduisant considérablement le prix d'un système de mesure tout en permettant de miniaturiser l'instrumentation actuelle et de baisser sa consommation énergétique ; une métrologie « libre », les systèmes de mesure étant construits à partir d'éléments électroniques modulables et ouverts de type Arduino permettant de concevoir des systèmes, de remplacer, de réparer ou de réutiliser ses éléments et d'élaborer des tutoriels de montage accessibles à tous ; une métrologie « connectée », les données étant transmises sur une plateforme de visualisation et de traitement ouverte permettant de créer des passerelles de connaissance en diffusant les données brutes via Internet et incitant les acteurs de l'eau à développer leur propre observation environnementale et à exploiter des données dont la production est maîtrisée. Le développement de cette approche renouvelle l'évaluation de l'utilité réelle d'une métrologie de plus en plus précise et coûteuse, dans un contexte d'observation et de surveillance des hydrosystèmes.

Keywords:

Aquatic environments
Data transmission
Hydrological monitoring
Innovative metrology
Low-tech
Stormwater
Water level
Water quality
Sensors
Weather station

ABSTRACT

Hydrosystems are structured, dynamic and coherent entities, which require adapted metrology to understand their functioning. With current metrology methods and tools, it is impossible to fully understand the environmental dynamics and responses related to climate change since they are unable to detect most of the pollution peaks and local and rapid hydro-meteorological phenomena. This implies a metrology adapted to the spatial and temporal scales relevant to the targeted physical, chemical and biological processes. The reflections proposed in this article are based on the research work carried out in the project "Cheap'Eau: innovative low-cost, open and connected solutions for stormwater monitoring", supported by the Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse and the OTHU research federation (Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine). The objective of this project is to define and design a new environmental metrology for the observation of hydrosystems: a "low-cost" and "frugal" metrology, the sensors used allow a significant reduction of the price of a device while offering the possibility to miniaturize the current instrumentation and reducing the power consumptions; an "open" metrology, the measurement systems being built from modular and open source electronic elements such as Arduino, allowing to design systems, to replace, repair or reuse elements of a system and to develop assembly tutorials accessible to all; a "connected" (Internet of Things) metrology, the data are sent on an online platform of visualization and open processing allowing the creation of knowledge bridges by disseminating raw data via the Internet and encouraging the water stakeholders to develop their own environmental observation and to exploit the data they produce themselves. The development of this approach renews the evaluation of the usefulness of an increasingly precise, but also costly, traditional metrology in a context of observation and monitoring of hydrosystems.

* Auteur correspondant – Courriel : ilane.cherif@univ-lyon2.fr

Introduction

Le suivi quantitatif et qualitatif des hydrosystèmes naturels et anthropisés est actuellement un des enjeux majeurs en matière de sécurité sanitaire, de protection contre les risques [DAI *et al.*, 2018; MAUGUIN, 2018], de ressource et de préservation de l'environnement. Il en résulte une forte demande de systèmes de mesure intelligents et déployés en de nombreux endroits, en particulier en contexte urbain où la surveillance d'infrastructures vieillissantes ou dispersées devient de plus en plus cruciale [OCDE, 2016]. Grâce aux progrès technologiques récents, de nouveaux systèmes de métrologie environnementale sont apparus. Moins coûteux (*low-cost*), plus compacts, plus sobres (*low-tech*), ouverts (*open source*) et connectés (*IoT*, Internet des Objets), ces nouveaux systèmes bouleversent la métrologie environnementale traditionnelle et entraînent un changement de paradigme en raison des possibilités de déploiement spatial qu'ils offrent. Ce paradigme représente le dernier stade de l'ère de l'information définie par HILBERT [2020] et initiée dans les années 1970 avec le développement des ordinateurs et de leur puissance de calcul, puis le développement des télécommunications et des médias sociaux, et enfin celui, plus récent, des algorithmes et des technologies de traitement impliquant de nombreux enjeux d'accès, de traitement en temps réel et de souveraineté des données massives. Dans le cadre du projet de recherche Cheap'Eau, financé par l'accord-cadre Observatoire de terrain en hydrologie urbaine OTHU - Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse RMC (2020-2023), des entretiens et des enquêtes ont été menés auprès de 35 acteurs de l'eau (collectivités et acteurs privés). Ces travaux ont mis en évidence une connaissance limitée du potentiel de ces nouveaux systèmes métrologiques par les opérationnels. Aujourd'hui, beaucoup d'acteurs de l'eau ne les connaissent pas et ne comprennent pas leur utilité ni leur potentiel. Ils ne sont donc pas prêts à les utiliser. Les résultats montrent toutefois qu'ils sont curieux et intéressés par ces nouvelles technologies et qu'ils sont plutôt demandeurs de solutions clés en main. Aujourd'hui les instrumentations classiques en place sont sous-exploitées par les acteurs opérationnels. Le succès du développement de ces nouvelles solutions (connectées, *low-cost*, *open source*) viendra de la valeur ajoutée des données et des informations auxquelles elles donneront accès.

Que sont ces nouveaux systèmes métrologiques ? Que peuvent-ils apporter de plus que la métrologie traditionnelle ? Quelles perspectives ouvrent-ils et quels nouveaux défis posent-ils ? Cet article propose des

éléments de réponse à ces questions en s'appuyant sur les travaux et les réflexions menés par le consortium du projet Cheap'Eau (INSA Lyon – Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE) – CNRS – Université de Lyon – Groupe de recherche Rhône-Alpes sur les infrastructures et l'eau (GRAIE) – AEGIR).

1. Une métrologie environnementale actuelle insuffisante

La métrologie environnementale a pour objectif d'informer sur le fonctionnement des hydrosystèmes, c'est-à-dire les cours d'eau, les plans d'eau, lac ou réseaux urbains d'eaux usées et pluviales. La connaissance issue de ces données permet de comprendre leur fonctionnement et leurs évolutions, et de les surveiller afin d'identifier des dysfonctionnements. Une métrologie environnementale pertinente doit donc être adaptée à l'hydrosystème observé. Or ce n'est généralement pas suffisamment le cas avec la métrologie actuelle.

1.1. Les hydrosystèmes sont cohérents, structurés et dynamiques

Il existe une cohérence fonctionnelle intrinsèque et inhérente à tout hydrosystème dont les changements d'état peuvent être considérés comme des réponses aux changements de flux (eau, sédiments, chaleur, matière organique, nutriments, minéraux), de formes (contraintes de l'espace physique, support des réactions biogéochimiques) et des biocénoses (diversité des activités biocénotiques). Ces logiques constituent un ensemble cohérent d'interrelations conduisant à l'apparition de points chauds (*hot-spots*) et de moments clés (*hot-moments*) de processus biologiques, physiques, chimiques [McCLAIN *et al.*, 2003; NAMOUR *et al.*, 2015] et sociaux. C'est le cas, par exemple, des crues et des rejets de déversoirs d'orage en rivière, ou encore d'efflorescences algales dans les lacs. L'identification de ces lieux et moments clés, ainsi que le suivi de leur dynamique nécessitent un réseau métrologique déployé dans l'espace et dans le temps de manière appropriée.

1.2. Limites de la métrologie actuelle

La métrologie actuelle pour le suivi des hydrosystèmes reste largement fondée sur des campagnes ponctuelles de prélèvements d'échantillons, leur analyse en laboratoire, puis leur interprétation. De la même manière que prétendre pouvoir reproduire un tableau à partir de bribes de l'original (*figure 1*), les méthodes de surveillance actuelles ont une résolution temporelle et

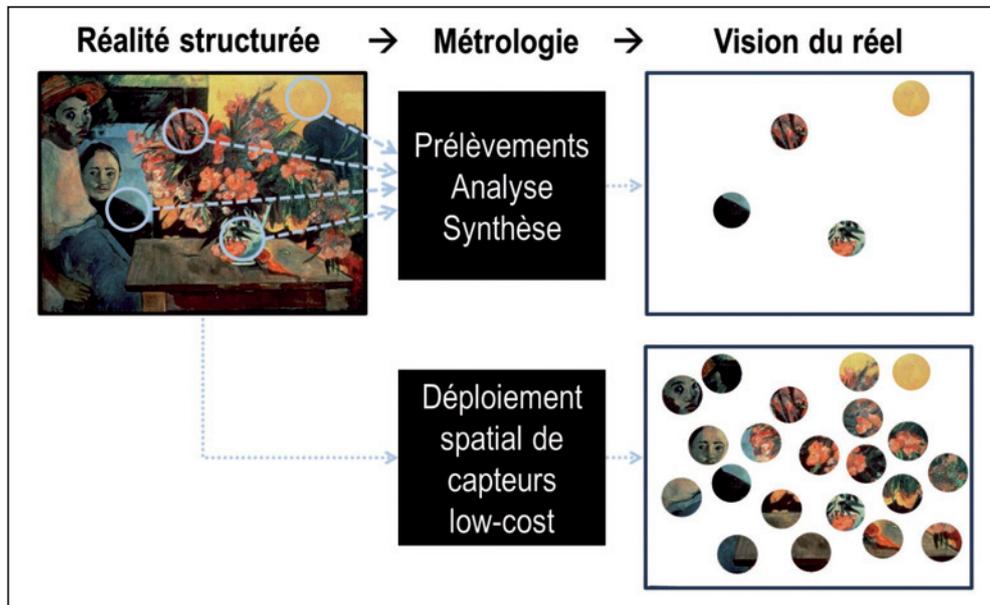


Figure 1. Réduction drastique d'une réalité structurée opérée par la métrologie environnementale actuelle et ses protocoles d'analyse ponctuels. À partir d'un tableau (ici Paul Gauguin, *Te tiare farani*, 1891, musée Pouchkine, Moscou) la pratique d'observation traditionnelle consiste à mesurer quelques points plus ou moins bien choisis et ensuite prétendre reconnaître, voire reconstituer le tableau original. Une analogie peut être opérée le suivi de la dynamique d'un hydrosystème

spatiale insuffisante (dans le cas de mesurages *in situ*). Or cette approche ne rend pas justice à la complexité et à la diversité des facteurs en jeu.

Depuis près de deux décennies des travaux scientifiques alertent sur les limites quant au suivi et à l'évaluation des masses d'eau, et en particulier des eaux urbaines [KIRCHNER *et al.*, 2004; NAMOUR *et al.*, 2012; BLUMENSAAT *et al.*, 2019]. Dans le cas des hydrosystèmes naturels, les protocoles conventionnels de suivi des milieux aquatiques sont souvent aveugles à la quasi-totalité des événements polluants, qu'il s'agisse des rejets urbains de temps de pluie (RUTP), et notamment ceux des déversoirs d'orage (DO), ou des ruissellements urbains polluants générés lors d'événements pluvieux. Or ces pics de pollution sont particulièrement impactants pour les biocénoses et représentent un risque pour la santé humaine. La dynamique temporelle de nombreux processus importants pour la qualité de l'eau est de l'ordre de quelques minutes à quelques heures, et non de quelques semaines à quelques mois comme le conçoivent les protocoles traditionnels de suivi de la qualité (campagnes mensuelles d'échantillons ponctuels, par exemple). Dans le cas des hydrosystèmes urbains, notamment les systèmes d'assainissement, les échelles de temps pertinentes varient de quelques minutes à quelques heures, et les échantillons moyens journaliers ou moyens événementiels collectés en trop faible nombre ne permettent pas d'appréhender la grande variabilité des phénomènes en jeu.

Pour établir une corrélation entre l'état physico-chimique et l'état écologique des hydrosystèmes naturels, il est nécessaire de procéder à des mesurages à des échelles temporelles et spatiales cohérentes avec les processus en jeu [HORSBURGH *et al.*, 2010]. Ainsi, une surveillance continue et en de nombreux lieux est essentielle pour déterminer correctement l'état physique, chimique et écologique d'un hydrosystème. Cependant, une telle surveillance est restée longtemps impossible du fait du coût de l'instrumentation, obligeant à produire une méthode insuffisante (points de mesure trop rares), ne permettant ni un suivi ni une gestion efficace des eaux urbaines [KIRCHNER *et al.*, 2004; NAMOUR *et al.*, 2012; BLUMENSAAT *et al.*, 2019]. Des difficultés similaires existent pour les hydrosystèmes anthropisés avec leurs propres échelles d'espace et de temps [BERTRAND-KRAJEWSKI, 2022]. Les connaissances issues de ces mesurages sont essentielles pour définir une surveillance pertinente des hydrosystèmes vis-à-vis d'objectifs opérationnels fixés (par exemple : la surveillance de la pollution).

1.3. Vers un nouveau paradigme d'observation des hydrosystèmes

Il est indispensable de mettre en place de nouvelles méthodes d'observation spécifiquement conçues pour mesurer les hydrosystèmes. Ces nouvelles approches doivent permettre aux gestionnaires de suivre plus

efficacement les tendances et l'évolution des hydrosystèmes, plutôt que de simplement fournir des données précises, mais limitées spatialement ou uniquement à des moments spécifiques. En d'autres termes, il est essentiel de développer une métrologie adaptée au système observé, capable de fournir des alertes pertinentes pour la gestion des hydrosystèmes. Le projet Cheap'Eau considère que cette nouvelle métrologie environnementale doit permettre de :

- 1) Densifier les points de mesure afin d'intégrer la structure spatiale de l'hydrosystème suivi dans le plan d'échantillonnage. Cela demande de surveiller plus largement le milieu considéré pour détecter les moments et points actifs transitoires en multipliant les capteurs.
- 2) Mesurer à haute fréquence (minute, heure) afin d'intégrer les dynamiques temporelles du milieu suivi et de détecter les moments transitoires signes de dysfonctionnement ou d'alerte.
- 3) Améliorer l'exploitation des données et informer en temps réel afin d'aller vers une maintenance proactive.
- 4) Concentrer les efforts sur le traitement de la donnée et utiliser des données complémentaires (données météorologiques, par exemple).
- 5) Maîtriser complètement la chaîne de mesure (du capteur à la donnée validée) afin de s'assurer de la fiabilité des données et de leur significativité.
- 6) Faciliter la gestion et l'évolution du système grâce à l'interopérabilité des composants.
- 7) Favoriser le transfert aux acteurs de l'eau et à la société civile, et permettre le partage des données

avec les parties prenantes [GEORGIADOU *et al.*, 2011].

Ces nouveaux systèmes adaptés à la configuration et à la dynamique des milieux suivis peuvent répondre à la fois aux besoins d'une métrologie opérationnelle (suivi et identification d'événements anormaux), mais également aux besoins de la recherche pour l'exploration et la compréhension fine des hydrosystèmes. Cela passe par la nécessaire réappropriation de la métrologie environnementale par les laboratoires. Il s'agit de comprendre et de connaître le matériel utilisé, ainsi que les algorithmes permettant de passer de valeurs mesurées dites « brutes » à une donnée élaborée ou exploitable. Pour la recherche, il s'agira d'être concepteur, fabricant et utilisateur de cette chaîne de mesure. Pour l'opérationnel ou l'exploitant, il s'agira de connaître l'offre de capteurs et ses distributeurs, d'avoir une donnée pertinente, fiable et à un coût raisonnable.

2. Présentation du projet Cheap'Eau : les matériels et les méthodes utilisés

2.1. Une méthode innovante à bas-coûts

2.1.1. Conception d'une nouvelle métrologie environnementale

La conception d'une nouvelle métrologie environnementale incite les acteurs de l'eau à utiliser des systèmes *low-cost* et connectés pouvant être assemblés par eux-mêmes, et permettant ainsi d'augmenter la couverture spatiale du suivi en déployant de nombreux capteurs, puis de centraliser et diffuser les données aux utilisateurs (figure 2). La possibilité de créer soi-même un

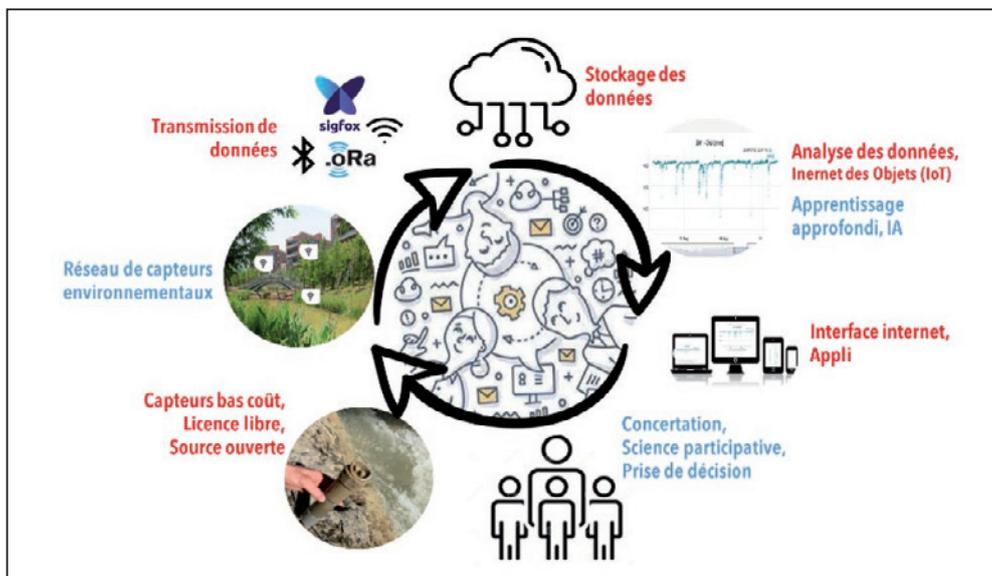


Figure 2. Schéma de principe du projet Cheap'Eau

système de mesure *low-cost* dans son intégralité nécessite une modularité forte des composants utilisés (*open source*) : il peut s'agir de combiner différents capteurs sur un même système de mesure, de déclencher des mesurages en fonction d'autres paramètres, mais également d'adapter les batteries et le système de recharge (très souvent des panneaux solaires) au contexte local et à l'autonomie souhaitée.

Les progrès technologiques ont permis de réduire les coûts de production des microcontrôleurs, des capteurs et plus généralement de l'ensemble des composants des systèmes. Ces progrès ont également permis de miniaturiser les composants rendant les systèmes plus compacts, donc plus facilement réalisables, transportables. Ils facilitent leur installation sur le terrain et assurent également leur discrétion. Une conséquence de la réduction des coûts a été l'adoption par un large public des composants électroniques et des microcontrôleurs : le marché ainsi créé a permis le développement de nombreuses plateformes, comme Arduino IDE⁹, facilitant la programmation des microcontrôleurs, le partage d'expérience et de connaissances pour réaliser des systèmes métrologiques, les produire en quantité et fiabiliser les composants. Le partage et la création de communautés coopératives prônant l'*open source* via les réseaux d'utilisateurs ou les Fablab garantissent l'accès facile à une information à jour, et toujours en phase avec les évolutions technologiques. Les progrès technologiques ont également permis des révolutions dans le domaine de la communication avec l'apparition de la communication *Low-Power Wide Area Network* (LPWAN) rendant possible l'envoi de petites quantités d'information sur des distances de plusieurs kilomètres (voire dizaines de kilomètres en dehors des villes) avec un coût énergétique très faible [MEKKI et al., 2019].

2.1.2. La densification des capteurs haute-fréquence

Pour multiplier les points de mesure et saisir plus finement la structure et la dynamique des hydrosystèmes à suivre, les capteurs utilisés doivent être de conception simple, robustes, modulaires, de faibles coûts, et doivent posséder une incertitude et une résolution maîtrisées ainsi qu'une dynamique de réponse en accord avec les phénomènes suivis. La reproductibilité de leurs caractéristiques compte alors plus que leur sensibilité ou leur limite de détection.

L'intégration de ces systèmes dans le cadre de projets de science participative ou de projets pédagogiques

avec des collèges ou des lycées est une perspective intéressante. Cette approche, au-delà d'une possibilité de densifier les réseaux d'observation, permettrait de sensibiliser et d'impliquer les citoyens dans l'observation de leur environnement proche [PAUL et al., 2017]. Beaucoup de concertation et de pédagogie sur le sujet est à faire entre les collaborateurs de Cheap'Eau et d'autres acteurs de la métrologie environnementale, comme par exemple avec le réseau Capteur & Science participative¹⁰ (CASPA). Cette activité nécessiterait aussi d'informer clairement les participants sur le but des études auxquelles ils contribuent et les « former » au montage et à l'entretien du matériel à l'aide de tutoriels vidéo ou d'instructions sur Internet.

2.1.3. Traitement des données, capteur virtuel

Ce nouveau paradigme permettra de multiplier les points de mesure au moyen de capteurs à bas-coûts choisis pour étudier des paramètres d'intérêt peu spécifiques, permettant d'obtenir davantage d'informations sur l'état de l'hydrosystème. Ils permettront de bâtir *a posteriori* des capteurs virtuels (*soft sensor*, *smart sensor*) après traitement des signaux reçus par des algorithmes évolués ; comme chez l'être humain, dont les capteurs sensoriels sont dédiés à mesurer un seul paramètre, mais dont le système de traitement des données (cerveau) est très performant (figure 3). La reconnaissance d'un vin à partir de l'odorat et de la vue devient une fusion complexe de sensations, de souvenirs et de contextes, mettant en évidence la manière dont notre esprit interconnecte ces éléments pour révéler l'identité d'un vin bien au-delà des sens seuls. L'approche est similaire à l'identification d'une « empreinte digitale » par un système de reconnaissance des formes.

Un réseau densément maillé de capteurs simples ou aux performances limitées permettrait de faire émerger au

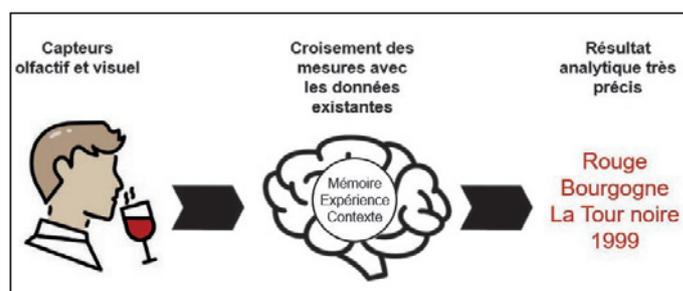


Figure 3. Illustration du principe de capteur virtuel par analogie au système sensoriel humain

¹⁰ NAVRATIL O. (2020) : Présentation du programme de recherche Cheap'Eau dans le cadre du Séminaire CASPA Capteurs et Sciences Participative. Francevision – 20 novembre. Vidéo disponible sur <https://www.youtube.com/watch?v=ASX12UeXvHY>

⁹ Site : <https://www.arduino.cc/en/software>

final une représentation bien plus riche, et souvent plus précise, grâce à une large quantité de données à traiter, et à un traitement pertinent de ces dernières. Tout capteur peut être intégré dans un système de capteurs virtuels et ses données mises en commun et traitées. Cette rationalisation métrologique revient à concentrer l'effort sur le traitement mathématique du signal et l'extraction d'informations pertinentes, plutôt que sur les capteurs implantés sur le terrain. Il est donc nécessaire d'avoir : i) des capteurs simples et robustes, aux caractéristiques métrologiques connues ; ii) un système d'acquisition et de transmission des données simple et optimisé ; et iii) une unité de traitement des données performantes avec une interface de communication des données vers les utilisateurs.

2.2. Un matériel peu cher, solide et fiable

2.2.1. Acquisition et transmission libre des données

Le développement ayant conduit à la création de logiciels libres et ouverts (LLO) s'étend maintenant au matériel. Le matériel libre et ouvert (MLO) est une opportunité de réduire radicalement le coût de la métrologie dans les sciences environnementales et dans la gestion des hydrosystèmes, tout en offrant la possibilité d'améliorer soi-même ses outils d'investigation. En particulier la combinaison de l'impression 3D et des microcontrôleurs à code source ouvert fonctionnant avec des logiciels libres permet de concevoir et fabriquer une instrumentation à faible coût en relativement peu de temps. Aujourd'hui, de tels systèmes de mesure ouverts, libres et à bas-coûts sont réalisables par les non-spécialistes (voir note 10). Le développement par des communautés d'utilisateurs de matériels ouverts et libres tels que Raspberry ou Arduino permet d'envisager la conception et la fabrication sur mesure de microcontrôleurs monocartes (un microcontrôleur Arduino Uno coûte moins de 20 €) ou des kits pour créer des systèmes de mesure interactifs capables de détecter et de contrôler des objets dans les mondes physique et numérique [KELLEY *et al.*, 2014 ; NIKHADE, 2015 ; LOCKRIDGE *et al.*, 2016]. Cette technologie peut réduire considérablement les coûts de surveillance : inférieurs à 100 €, contre 1 000-2 000 € pour les premiers prix commerciaux traditionnels. Les technologies à code source ouvert permettent de réaliser des économies substantielles par rapport à des outils propriétaires équivalents ou moins fonctionnels. Selon PEARCE [2020], les économies s'élèvent à 87 % pour l'utilisation de technologies libres et ouvertes. En combinant l'Arduino et l'impression 3D, les économies peuvent atteindre en moyenne 94 % par rapport aux équivalents

commerciaux. À noter que PEARCE [2020] n'a pas inclus le temps nécessaire à la fabrication des MLO, variable selon les situations. Il convient d'ajouter à ces chiffres le coût de la main-d'œuvre et des frais généraux.

Mais la réduction des coûts et du temps n'est en fait qu'un avantage secondaire de l'utilisation des MLO. Les principaux avantages de l'*open source* sont la personnalisation et la maîtrise de l'instrumentation, offrant une modularité similaire à celle de l'assemblage de briques élémentaires [PROST-BOUCLE *et al.*, 2022], aussi bien dans la façon de relier les éléments électroniques que dans la sélection des grandeurs à suivre. Plutôt que d'acheter ce qui est en rayon ou disponible auprès de vendeurs en ligne, il est possible de créer des instruments répondant exactement aux besoins et aux spécifications des acteurs opérationnels et de la recherche. Cette possibilité de maîtrise totale de l'instrumentation est fondamentale, elle permet de proposer des solutions sur mesure (choix des paramètres à mesurer) à une collectivité ou à des gestionnaires.

2.2.2. Prototypage et tests préliminaires

Il est indispensable d'évaluer les incertitudes et de valider les données, chaque appareil de mesure étant sélectionné en fonction de sa pertinence par rapport à la grandeur étudiée. Par exemple, dans le cas du mesurage de la hauteur d'eau dans un ouvrage, le consortium du projet Cheap'Eau a sélectionné un capteur ultrasonore parmi les sondes *low-cost* disponibles dans le commerce, car offrant le meilleur ratio prix/performance [CHERQUI *et al.*, 2020]. Une analyse fine internationale de l'utilisation de capteurs commerciaux *low-cost* dans le domaine de la gestion de l'eau a également été menée [ZHU *et al.*, 2023] ; cette étude a montré la diversité des solutions existantes, mais également le manque de connaissances sur leurs performances réelles.

Les prototypes développés dans le cadre du projet Cheap'Eau ont systématiquement été soumis à des tests sur le terrain, sur des durées de plusieurs mois à plus de deux années, sur de nombreux sites, avec un fonctionnement autonome assuré et des données mesurées représentatives des processus hydrologiques ayant lieu dans les hydrosystèmes étudiés. Le *tableau 1* montre la diversité et la modularité des dispositifs bas-coûts développés dans le cadre de Cheap'Eau.

Bien que le projet Cheap'Eau soit centré sur l'hydrologie urbaine, la pluridisciplinarité des méthodes employées est illustrée par la diversité des capteurs, dont les applications sont uniquement limitées par l'imagination de l'utilisateur. L'assemblage des composants

Type de mesurage	Objectifs généraux	Systèmes/ milieux à suivre	Paramètres physiques à mesurer	Choix de capteur (type et références)	Prix du capteur choisi
Niveau d'eau Système « Niveaudo »	Mesurage du niveau d'eau dans les lacs, ouvrages et aménagements d'eaux pluviales	Bassins d'infiltration, déversoirs d'orage	Hauteur d'eau	Capteur ultrasonore (JSN SR04T)	20 €
				Piézomètre (Gravity KIT0139)	45 €
			Température	Sonde de température (DS18B20)	8 €
Bio-potentiel	Mesurage indirect des événements pluvieux et de la teneur en eau des sols	Arbres	Tension au niveau du phloème et du xylème	Vis électrodes	5 €
Qualité de l'eau [GISI et al., 2022]	Détection des particules en suspension dans l'eau	Ouvrages, rivières	Turbidité	Capteur optique de turbidité (SEN0189)	12 €
Station météo [ZHU, 2023]	Suivi météorologique	Toiture végétalisée, arbre, ouvrages, etc.	Pression atmosphérique	Sonde de pression et de température (BME280)	~5 €
			Température		
			Humidité relative et température	Hygromètre / thermomètre (DHT22)	~5 €
			Vitesse et direction du vent	Anémomètre (WH-SP-WS01) + Anémoscope (WH-SP-WD)	~20 € + ~20 €
Pluviométrie [ZHU, 2023]	Complément de la station météo	Toiture végétalisée, arbre, etc.	Précipitation	Pluviométrie optique (RG-15)	~80 €
				Pluviomètre à auget (WH-SP-RG)	~15 €
Géophone*	Analyse du transport par charriage	Rivières	Sismicité	Géophone (Géospace GS20DX)	~80 €

*Appareil non low-cost, mais l'envoi des données est assuré par un microcontrôleur Arduino et une carte d'acquisition conçue pour le projet Cheap'Eau.

Tableau I. Synthèse des différents types de capteurs testés dans le cadre du projet Cheap'Eau

peut être effectué par toute personne ayant des compétences élémentaires en électronique, car les soudures sont évitées au maximum en confectionnant des circuits électroniques adaptés. Ils ont, par exemple, été utilisés par des étudiants de Master sans compétences ni connaissances préalables en métrologie environnementale ou en électronique. Ils ont monté, puis installé cinq systèmes de mesure sur le terrain pour suivre le fonctionnement hydraulique de noues sur la Métropole de Lyon.

Chaque dispositif présenté (tableau I) comporte au moins un microcontrôleur Arduino (~50 €) ou équivalent, un capteur (ex. : piézomètre, capteur ultrasonore de hauteur, turbidimètre), un moyen de stockage (carte SD ~7 € et un lecteur Arduino ~20 €), un système d'alimentation (batterie Lipo ~20 €, un petit panneau solaire ~15 €, et un régulateur de charge ~15 €), une antenne réseau LoRaWan (~5 €), une plaquette de montage ainsi qu'un boîtier PVC pour encapsuler le système et le protéger des intempéries. Pour le système « Niveaudo » complet permettant de mesurer la hauteur d'eau et la température de l'air toutes les 10 minutes, le prix est inférieur à 250 €. Ce coût prend en compte le matériel nécessaire, mais bien évidemment pas les ressources associées au développement. La mise en capsule des éléments électroniques peut être davantage simplifiée, en imprimant en 3D des boîtiers sur mesure, donc adaptés à la taille des cartes utilisées, des capteurs choisis et de l'hydrosystème étudié. En comparaison, les appareils commerciaux traditionnels analogues utilisant des ultrasons coûtent aux alentours de 2000 € seuls, et le prix peut augmenter jusqu'à 4000 € si on ajoute un datalogger performant.

Le pas de temps choisi entre deux mesurages est généralement compris entre 1 et 15 minutes selon la dynamique de l'hydrosystème, avec une durée d'acquisition inférieure à une minute (par exemple une série de 20 mesurages successifs dont seule la médiane est enregistrée). Dans un souci d'autonomie, la carte d'acquisition est conçue et programmée pour économiser l'énergie du dispositif en éteignant les capteurs entre deux acquisitions. Autre exemple, en cas d'échec d'envoi de la donnée en ligne, le système est forcé à l'arrêt au bout de 2 minutes, évitant de vider la batterie.

Certains capteurs sont des éléments détournés de leur utilisation initiale, et éventuellement modifiés pour être adaptés aux sites d'étude. Par exemple, la sonde de turbidité SEN0189 est utilisée dans les lave-linge [GISI et al., 2022] et la sonde ultrasonore JSN SR04T est un capteur de recul pour de nombreuses voitures. L'avantage est que ces capteurs sont massivement produits

pour l'industrie, donc fiables (à l'image du capteur de recul pour voitures) et à des coûts faibles. Toutefois, les notices des constructeurs sont souvent absentes, incomplètes ou erronées. Il est donc indispensable de procéder à des tests et à un étalonnage systématique de chaque capteur *low-cost*. Il est important de rappeler au passage que tout capteur, qu'il soit à bas coûts ou non, doit être étalonné avant son utilisation.

3. Suivi des hydrosystèmes (et des systèmes d'observation) à distance

3.1. Accessibilité des données brutes en quasi-temps réel

Les systèmes métrologiques réalisés dans le cadre (ou en partenariat) du projet Cheap'Eau sont répertoriés sur une plateforme en ligne développée pour le projet¹¹. Opendataeau est une plateforme commune rassemblant et donnant un accès libre en temps réel à des chroniques de mesure environnementales en lien avec la gestion de l'eau et produites par différents laboratoires de recherche publics et leurs partenaires. Elle vise ainsi à communiquer et à mettre à disposition du plus grand nombre des données sur l'eau, et plus spécifiquement en climatologie, hydrologie et géomorphologie fluviale. Cet outil s'adresse à toutes les personnes intéressées : les collectivités, les bureaux d'études, les chercheurs, les associations et le grand public. Les objectifs s'inscrivent dans des perspectives de Science Ouverte et plus particulièrement ils visent à i) diffuser des données libres d'utilisation, brutes, sans interprétation ni traitement; ii) offrir une plateforme en ligne pour suivre en quasi-temps réel les environnements proches (ex. : systèmes urbains, rivières, bassins versants) grâce à des objets connectés de surveillance de l'environnement; iii) suivre des systèmes de mesure afin d'en améliorer la maintenance et donc la qualité des données produites; iv) proposer une interface simple de visualisation et de téléchargement des données; v) offrir une plateforme en ligne pour réaliser des premières comparaisons de chroniques (par exemple la température sur différents sites ou la comparaison de variables environnementales sur un même site).

Opendataeau permet d'indiquer la position de chaque système et surtout de visualiser les données en temps réel. L'accessibilité aux données brutes est en effet au cœur du changement de paradigme annoncé, il est alors primordial de pouvoir récupérer gratuitement les

¹¹ Site : <http://opendataeau.org>

relevés *in situ* et les exploiter librement. Les options d'Opendataeau permettent de sélectionner les séries temporelles en fonction des capteurs, des paramètres enregistrés et des plages de données disponibles, afin de les visualiser directement comme illustré *figure 4* ou de les exporter au format CSV pour que les utilisateurs puissent les interpréter avec d'autres outils et logiciels. Plusieurs outils en ligne sont disponibles tels que Grafana, Influxdb ou Nodered, qui permettent à tous les utilisateurs de centraliser leurs données, sans devoir développer un nouveau site Internet par projet. Toutefois, afin d'archiver et en cas d'échec de l'envoi en ligne, les données sont stockées localement sur une carte SD sous forme de fichiers CSV, indiquant la date et l'heure des mesurages, et les grandeurs propres à chaque dispositif. Les données fournies sur le site Opendataeau sont brutes, c'est-à-dire directement issues des systèmes de mesure sans filtrage ou correction.

3.2. Production de graphiques et description de quelques dispositifs installés

Les séries temporelles de la *figure 5* ont été produites à partir des données disponibles sur la plateforme Opendataeau, démontrant la fiabilité de la transmission et de l'enregistrement des données en ligne sur plusieurs années. L'analyse de ces données en détail, ou la

critique des résultats obtenus ne sont pas l'objet de cet article ; il s'agit simplement ici d'illustrer la diversité et la capacité de déploiement mentionnées dans les paragraphes précédents.

La *figure 5a* montre les valeurs de la tension (mV) enregistrées par deux électrodes (vis Inox) installées dans un arbre situé à proximité d'une rivière sèche sur le campus de la Doua. Le signal obtenu représente le bio-potentiel, paramètre lié aux flux de sève dans les tissus de l'arbre [GIBERT *et al.*, 2006]. Suivre cette tension dont les variations sont influencées par l'environnement proche de l'arbre représente donc une méthode indirecte pour étudier les événements pluvieux ou les périodes de sécheresse vécues par l'arbre.

Le transport de galets par le Rhône est enregistré par un géophone implanté sur ses berges dans le cadre d'un projet de l'OSR (Observatoire des sédiments du Rhône ; *figure 5b*). Le système installé utilise un géophone traditionnel (GS20DX Geospace) et une carte de traitement des signaux sismiques. En revanche, l'acquisition et l'envoi des données sont assurés par une carte d'acquisition développée dans le cadre du projet Cheap'Eau. Le développement d'un système métrologique hybride de ce type (capteur traditionnel et acquisition *low-cost*) démontre que les mesurages actuellement effectués par des sondes onéreuses et qui permettent une modification

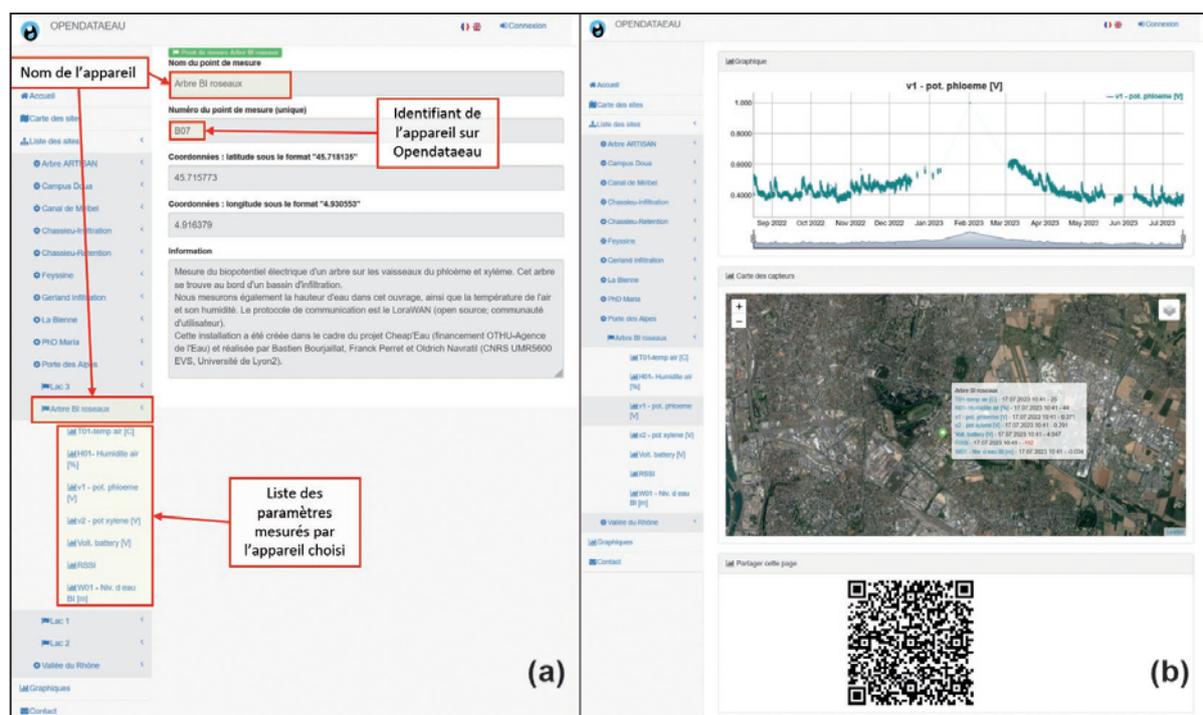


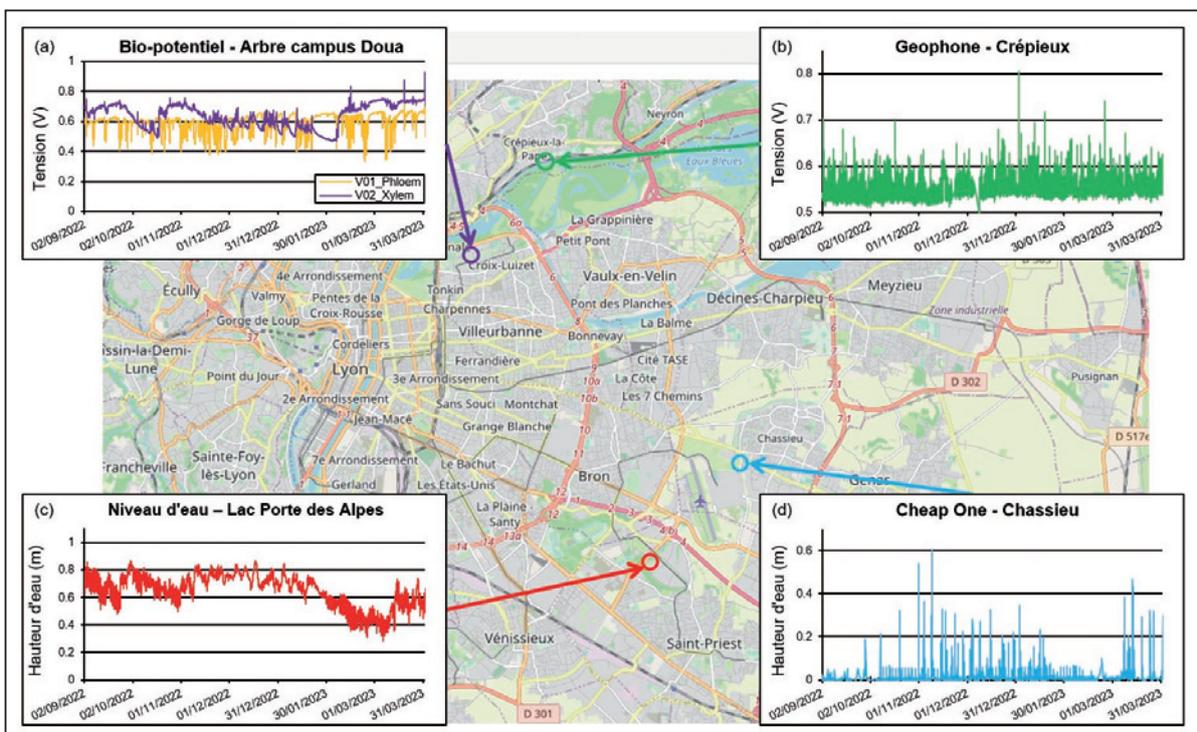
Figure 4. Captures d'écran du site Opendataeau : (a) Sélection et description d'un capteur dans la liste des sites suivis par le projet Cheap'Eau. (b) Affichage des données transmises *via* LoRaWAN directement en ligne, ici : la tension v1 mesurée au niveau du phloème d'un arbre situé à proximité d'un bassin d'infiltration de Porte des Alpes, à Lyon

libre, peuvent être reliés au réseau de capteurs *low-cost* afin de centraliser les données et profiter du parc d'appareils actuellement installés.

Pour suivre la hauteur d'eau d'un lac de gestion des eaux pluviales (figure 5c), il a été décidé en fonction du contexte local de placer un piézomètre au fond du lac. En ce qui concerne la validation de ce capteur *low-cost* (Gravity KIT0139 ou ALS YB-2J-F ou ALS-MPM-2F ou TL231 selon les distributeurs), les valeurs mesurées sont comparées à celles d'un piézomètre de référence (Paratronic CNR 5), qui est placé au même endroit et

envoie ses données en utilisant le même microcontrôleur. Le capteur *low-cost* ayant été testé en détail en laboratoire, les tests de terrain ont visé à évaluer le comportement à long terme (> 1 an) du système métrologique (capteur + système d'acquisition).

Le système « Niveaudo – Cheap One » a été conçu à partir d'un capteur ultrasonore JSN SR04T (figure 6a). Il a été placé dans un bassin de rétention de l'Observatoire de terrain en hydrologie urbaine (OTHU) à proximité de sondes radar et ultrasonores traditionnelles, qui sont utilisées pour le suivi en continu du bassin (figure 5d et 6b).



(a) Suivi du bio-potential au niveau du phloème et du xylème d'un arbre situé sur le campus de la Doua ; (b) données enregistrées par le géophone installé au bord du Rhône à Crépieux dans le cadre de l'OSR (Observatoire des sédiments du Rhône) ; (c) suivi de la hauteur d'eau d'un lac situé à Porte des Alpes, avec un piézomètre *low-cost* et un piézomètre de référence ; (d) suivi de la hauteur d'eau par ultrason dans une conduite en entrée du bassin de rétention Django Reinhardt (site d'étude OTHU). Les dispositifs « Niveaudo » permettent de mesurer la hauteur d'eau en continu, en utilisant une sonde ultrasonore ou de pression en fonction du milieu à suivre.

Figure 5. Localisation de quelques sites d'étude du projet Cheap'Eau sur Lyon et sa périphérie

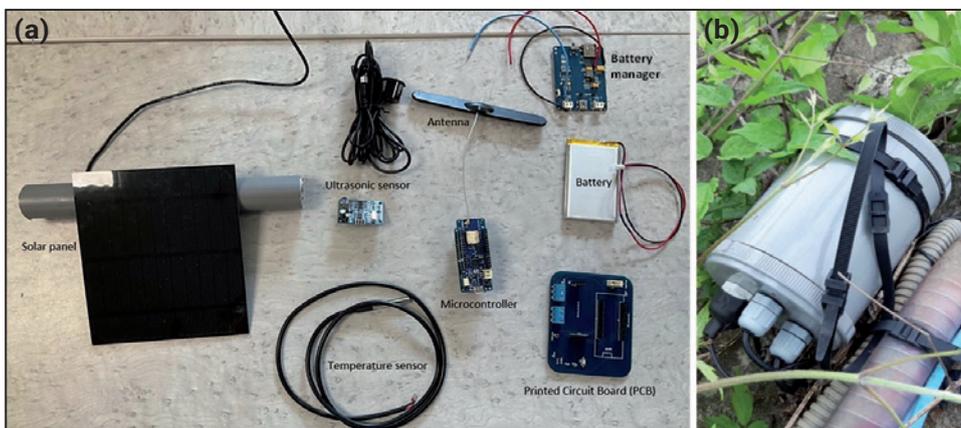


Figure 6. Éléments du système Niveaudo – Cheap One (a), contenus à l'intérieur d'une capsule en PVC (b)

Ces appareils servent également de référence pour la validation du prototype et l'évaluation de la fiabilité de la métrologie à bas-coûts. Ce système est en fonctionnement de façon autonome (sur panneau solaire) depuis plus de deux ans avec quelques mises à jour logicielles en cas de problèmes sur le calcul de la hauteur d'eau [SCHNEIDER *et al.*, 2020; PAEPAE *et al.*, 2021]. Dans un contexte de changement de paradigme, il serait envisageable de suivre le débit et les rejets de déversoirs d'orage en rivières en plaçant stratégiquement des sondes NiveauDo le long des écoulements dans le réseau d'assainissement et dans le cours d'eau, apportant un suivi plus complet.

Conclusion

La métrologie *low-cost* est souvent abordée avec pour seul objectif la réduction des coûts des dispositifs et des appareils de mesure, ce qui est effectivement réalisable avec les développements technologiques et informatiques de ces dernières décennies. Mais le projet de recherche Cheap'Eau a montré, d'une part, que le temps de conception nécessaire à la réalisation et aux tests de ces capteurs était très important et devait entrer dans le bilan économique et, d'autre part, que cette métrologie offre bien d'autres intérêts qui ne peuvent être réduits au seul aspect *low-cost*. L'utilisation de capteurs *low-cost* requiert des connaissances en métrologie souvent plus poussées que dans le cadre de l'utilisation de capteurs traditionnels, afin notamment de gérer les données brutes ou remédier à l'absence de fiche technique. Cette nouvelle métrologie aide à pallier l'insuffisance de la surveillance des hydrosystèmes naturels et anthropisés par le déploiement d'un plus grand nombre d'appareils de mesure de robustesse équivalente, pour un budget identique. La visualisation des données en

temps réel permet aussi une meilleure gestion à court terme des dispositifs (arrêt du fonctionnement, perturbation non prévue). D'autre part, l'assemblage des capteurs offre une grande liberté dans le choix des paramètres à mesurer (pression, température, etc.) et dans l'intégration des dispositifs métrologiques dans les hydrosystèmes suivis. Enfin, l'utilisation des MLO aide l'ensemble des acteurs du domaine, car les données peuvent être diffusées massivement en ligne et être exploitées librement par les parties prenantes. Cependant, ces avantages ne dispensent pas du travail de validation des données, ni du choix de la stratégie de suivi (lieux pertinents) pour effectuer les mesurages.

Remerciement

Les auteurs de l'article remercient l'agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse pour son soutien financier dans le cadre de l'accord-cadre de collaboration OTHU/AERMC et du projet de recherche Cheap'Eau (Solutions innovantes à bas-coûts libres connectées pour le suivi des eaux pluviales). Ils remercient également l'OTHU et la Métropole de Lyon pour avoir permis l'installation de capteurs sur différents sites d'étude, ainsi que le GRAIE pour son soutien à la valorisation et au transfert des résultats obtenus. Ce travail a été réalisé au sein de l'EUR H2O'Lyon (ANR-17-EURE-0018) de l'Université de Lyon (UdL), dans le cadre du programme « Investissements d'avenir » géré par l'Agence nationale de la recherche (ANR). Enfin, merci à Jérôme Pouilloux, ingénieur informaticien, pour le développement de la plateforme Opendataeau, ainsi qu'aux stagiaires (Nicolas Armand, Stefan Volff, Sarah Coladonato, Adam Adewolu, Benoît Anquez, Fanny Bourgeau, Robin Mourelon) et aux doctorants (Qingchuan Zhu, Maria Gisi) ayant contribué au projet.

Bibliographie

BERTRAND-KRAJEWSKI J.-L. (2022) : « Mesurage en continu et échantillonnage : pourquoi faut-il aller au-delà de la réglementation ? » In : Bacot L., Barraud S., Lipeme Kouyi G., eds. *Gestion des eaux pluviales en ville – 20 ans de recherche au service de l'action*. Villeurbanne (France) : GRAIE, p. 50-55. Disponible en ligne : https://www.graie.org/graille/doc_telech/OUVRAGE-OTHU/OTHU-GRAIE_Gestion%20des%20eaux%20pluviales%20en%20ville_2022_complet.pdf

BLUMENSAAT F., LEITÃO J.P., ORT C., RIECKERMANN J., SCHEIDEGGER A., VANROLLEGHEM P.A., VILLEZ K. (2019) : « How urban storm- and wastewater management prepares for emerging opportunities and threats: digital transformation, ubiquitous sensing, new data sources, and beyond – A horizon scan ». *Environmental Science & Technology*; 53 : 8488-98.

CHERQUI F., JAMES R., POELSMA P., BURNS M.J., SZOTA C., FLETCHER T., BERTRAND-KRAJEWSKI J.-L. (2020) : « A platform and protocol to standardise the test and selection low-cost sensors for water level monitoring ». *H2Open Journal*; 3(1) : 437-56.

DAI Q., SHIN E., SMITH C. (2018) : *Open and inclusive collaboration in science: A framework*. OECD Science, Technology and Industry Working Papers, No. 2018/07, OECD Publishing, Paris. doi : 10.1787/2dbff737-en.

GEORGIADOU Y., BANA B., BECHT R., HOPPE R., IKINGURA J., KRAAK M.J., LANCE K., LEMMENS R., LUNGO J.H., MCCALL M., MISCIONE G., VERPLANKE J. (2011) : « Sensors, empowerment, and accountability: a Digital Earth view from East Africa ». *International Journal of Digital Earth*; 4(4) : 285-304.

- GIBERT D., LE MOUËL J.-L., LAMBS L., NICOLLIN F., PERRIER F. (2006) : « Sap flow and daily electric potential variations in a tree trunk ». *Plant Science*; 171(5) : 572-84.
- GISI M.F.S., NAVRATIL O., CHERQUI F., COSSART E., FLETCHER T., RUSSEL K., DA SILVA V.R.M., MAUER L., KREIG P., ANQUEZ B., NAMOUR P. (2022) : « Low-cost turbidimeter: from the washing machine to the research field ». *Proceedings of the 7th IAHR Europe Congress, Athens (Greece), 7-9/09/2022*, 2 p. Disponible en ligne sur <http://www.iahr.org/library/infor?pid=22360>
- HILBERT M. (2020) : « Digital technology and social change: The digital transformation of society from a historical perspective ». *Dialogues in Clinical Neuroscience*; 22(2) : 189-94.
- HORSBURGH J.S., SPACKMAN JONES A., STEVENS D.K., TARBOTON D.G., MESNER N.O. (2010) : « A sensor network for high frequency estimation of water quality constituent fluxes using surrogates ». *Environmental Modelling and Software*; 25(9) : 1031-44.
- KELLEY C.D., KROLOCK A., BRUNNER L., BURKLUND A., KAHN D., BALL W.P., WEBER-SHIRK M. (2014) : « An affordable open source turbidimeter ». *Sensors*; 14(4) : 7142-55.
- KIRCHNER J.W., FENG X. H., NEAL C., ROBSON A.J. (2004) : « The fine structure of water-quality dynamics: the (high-frequency) wave of the future ». *Hydrological Processes*; 18(7) : 1353-9.
- LOCKRIDGE G., DZWONKOWSKI B., NELSON R., POWERS S. (2016) : « Development of a low-cost Arduino-based sonde for coastal applications ». *Sensors*; 16(4) : 528.
- MAUGUIN P. (2018) : « Le citoyen, ce scientifique : Quand la production du savoir scientifique se démocratise ». *Pour la science*; 492 : 49-55.
- McCLAIN M. E., BOYER E.W., DENT C.L., GERGEL S.E., GRIMM N.B., GROFFMAN P.M., HART S.C., HARVEY J.W., JOHNSTON C.A., MAYORGA E., McDOWNELL W.H., PINAY G. (2003) : « Biogeochemical hot spots and hot moments at the interface of terrestrial and aquatic ecosystems ». *Ecosystems*; 6 : 301-12.
- MEKKI K., BAJIC E., CHAXEL F., MEYER F. (2019) : « A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment ». *ICT Express*; 5(1) : 1-7.
- NAMOUR P., BREIL P., CLÉMENT Y., DE SOUSA G., CHANET J.-P., LANTERI P. (2012) : « The Water Framework Directive requires new tools for a better water quality monitoring ». *E-Water*; 2012/01, 12 p.
- NAMOUR P., ESCHBACH D., SCHMITT L., MOULIN B., FANTINO G., BORDES C., BREIL P. (2015) : Stream pollution concentration in riffle geomorphic units (Yzeron basin, France). *Science of the Total Environment*; 532 : 80-90.
- NIKHADE S. G. (2015) : « Wireless sensor network system using Raspberry Pi and zigbee for environmental monitoring applications ». In : *Proceedings of the International Conference on Smart Technologies and Management for Computing, Communication, Controls, Energy and Materials (ICSTM)*, Chennai (India), 6-8 May 2015. doi : 10.1109/ICSTM.2015.7225445.
- OCDE (2016) : *Water Governance in Cities*. Paris (France): OCDE. Disponible en ligne : <https://www.oecd.org/governance/water-governance-in-cities-9789264251090-en.htm>
- PAEPAE T., BOKORO P. N., KYAMAKYA K. (2021) : « From fully physical to virtual sensing for water quality assessment: A comprehensive review of the relevant state-of-the-art ». *Sensors*; 21(21) : 6971.
- PAUL J.D., BUYTAERT W., ALLEN S., BALLESTEROS-CÁNOVAS J.A., BHUSAL J., CIESLIK K., CLARK J., DUGAR S., HANNAH D.M., STOFFEL M., DEWULF A., DHITAL M.R., LIU W., NAYAVAL J.L., NEUPANE B., SCHILLER A., SMITH P.J., SUPPER R. (2017) : « Citizen science for hydrological risk reduction and resilience building ». *WIREs Water*; 5(1) : e1262.
- PEARCE J.M. (2020) : « Economic savings for scientific free and open source technology: A review ». *HardwareX*; 8 : e00139.
- PROST-BOUCLE S., KAMGANG NZEUFO H., BARDO T., MOREAU S., GUYARD H., DUWIG C., KIM B., DUBOIS V., GILLOT S., CLÉMENT R. (2022) : « Capteurs bon marché et centrales d'acquisition DIY pour les eaux usées : le projet Setier ». *Techniques Sciences Méthodes*; 1/2 : 35-44.
- SCHNEIDER M.Y., FURRER V., SPRENGER E., CARBAJAL J.P., VILLEZ K., MAURER M. (2020) : « Benchmarking soft sensors for remote monitoring of on-site wastewater treatment plants ». *Environmental Science & Technology*; 54(17) : 10840-9.
- ZHU Q. (2023) : *Low-cost sensors for monitoring stormwater source control measures - Chapter 4: Low-cost meteorological sensors performance assessment* [thèse]. INSA Lyon, Villeurbanne, 289 p.
- ZHU Q., CHERQUI F., BERTRAND-KRAJEWSKI J.-L. (2023) : « End-user perspective of low-cost sensors for urban stormwater monitoring: a review ». *Water Science and Technology*; 87(11) : 2648-84.