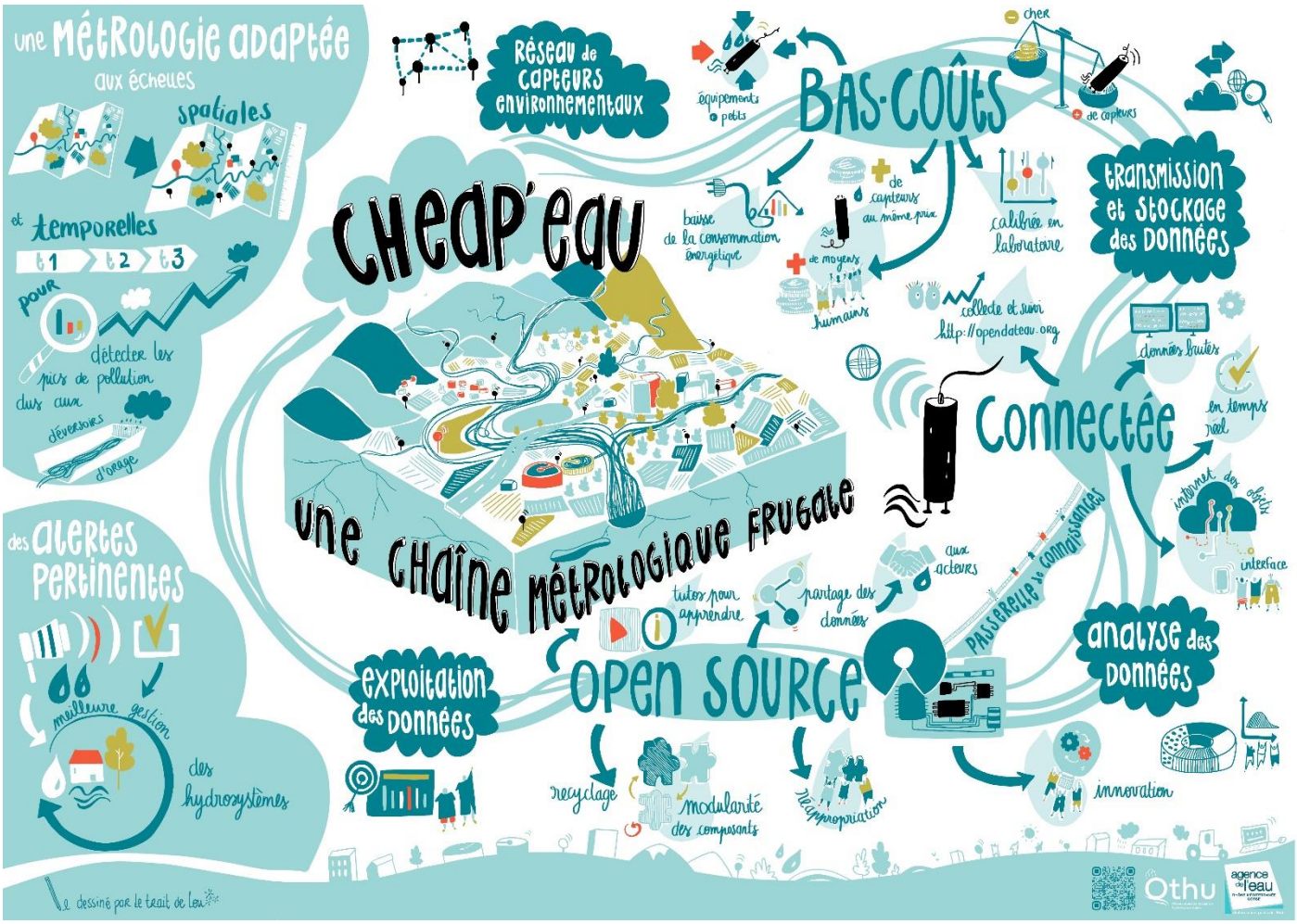
RAPPORT FINAL | Programme de recherche Cheap'eau

OTHU

CHEAP'EAU

SOLUTIONS INNOVANTES
BAS COÛT - LIBRES - CONNECTÉES
| SUIVI | EAUX PLUVIALES |

agence de l'eau RHÔNE MÉDITERRANÉE CORSE
établissement public de l'État



EVS Environnement, Ville, Société UMR 5600 | INSA deep LYON | INRAE | INSTITUT DES SCIENCES ANALYTIQUES | ÆGIR | graie | GRANDLYON la métropole | UNIVERSITÉ LUMIÈRE LYON 2

Juin 2024

Ce programme financé dans le cadre de l'accord cadre Agence de l'eau RMC / OTHU a été animé depuis 2019 par Oldrich NAVRATIL (EVS - Université Lyon 2) avec l'appui de Laëtitia Bacot, Graie (et OTHU), et a impliqué de nombreux collaborateurs cités ci-dessous :

Ingénieurs d'études du Projet : Lionel LORD, Julien CASTRO, Bastien BOURJAILLAT, Ilane CHERIF
Doctorants : Maria GISI, Qingchuan ZHU, Noémie ETIENNE, Paulo RIBEIRO
Stagiaires : Fanny BOURGEAU, Robin MOURELON
EVS, Univ. Lyon 2 : Oldrich NAVRATIL, Franck PERRET
INSA Lyon, DEEP : Jean-Luc BERTRAND-KRAJEWSKI, Frédéric CHERQUI, Nicolas WALCKER
INRAE (ex Irstea-Lyon), RiverLy : Philippe NAMOUR
UMR 5280 ISA : Latifa BOUCHET
Graie-OTHU : Laëtitia BACOT
ÆGIR : Priscille BEGUIN
AERMC : Camille ARNAULT
Lyon Métropole : Hervé CALTRAN

Plus d'informations sur le projet :
http://www.graie.org/othu/progr_cheapeau.htm

2024
ÉDITION GRAIE

graie PÔLE EAU & TERRITOIRES

Avec le soutien de :

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE Liberté Égalité Fraternité
agence de l'eau RHÔNE MÉDITERRANÉE CORSE
OTHU

Pour citer le rapport :

Navratil O. *et al*. (2024) Cheap'Eau : solution innovantes, bas couts et connectées pour la métrologie des eaux pluviales. Rapport final des recherches menées dans l'accord cadre OTHU-AERMC. Université Lyon2, CNRS, INSA, GRAIE, INRAE. 32p.

RESUME

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 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 métiers de l'eau à développer leur propre observation environnementale et à exploiter des données dont la production est maitrisée. 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. Vous trouverez avec ce rapport final, une déclinaison des principaux résultats sous forme de fiches synthétiques et visuelles pour aider à la lecture.

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.*

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. With this final report, you will find a summary of the main results in the form of visual factsheets to help you read the report.

Keywords: *aquatic environments, data transmission, hydrological monitoring, innovative metrology, low-tech, stormwater, water level, water quality, sensors, weather station.*

SOMMAIRE

Résumé 2
Abstract 2
Le projet, Les taches et le consortium 4
Identification du projet 7
Synthèse de la philosophie « Cheap'Eau » 9
Tâche 0 : Gestion de projet 12
Tâche 1 : Choix des variables à mesurer 14
Tâche 2 : Choix des systèmes et développements techniques 18
Tâche 3 : Tests en milieux contrôlés 20
Tâche 4 : Évaluation sur le terrain en comparaison avec les systèmes traditionnels 21
Tâche 5 : Transfert des résultats et valorisation opérationnelle 25
Conclusions et perspectives 27
Liste des publications (Bibliographie Cheap'Eau) : 28
Références externes 30
Annexes : Fiches techniques 32

Différentes fiches techniques (18 au total) montrent de manière plus exhaustive les différents aspects abordés dans le projet Cheap'Eau. Elles apporteront plus de détails sur les méthodes et les systèmes développés. Chaque fiche est associée à une ou plusieurs tâches techniques selon le code ci-dessous.

T2	T3	T4	T5

LE PROJET, LES TACHES ET LE CONSORTIUM

Cheap'Eau est un projet de recherche de 48 mois visant à concevoir et évaluer des systèmes innovants et économes pour la surveillance et la gestion de la quantité et qualité des Eaux Pluviales (EP) en différents points d'un système d'assainissement. Les systèmes métrologiques Cheap'Eau, allant de l'acquisition *in-situ* (capteur) au stockage de la donnée chez le gestionnaire, sont basés sur des capteurs *low-cost* du commerce et des plateformes de prototypage électronique open-source de type Arduino®, Pycom® ou Raspberry®.

Nous souhaitons ainsi proposer des réseaux de surveillance bas-coûts (*Low-Cost* Sensors Network, LCSN) des eaux pluviales qui soient : 1) bas-coûts ou frugaux, *i.e.* permettant une nette diminution des coûts des capteurs, de leur installation et de leur gestion; 2) respectueux de l'environnement, *i.e.* une consommation énergétique et un impact limités; 3) libres, *i.e.* basés sur des technologies *open-source* ; 4) accessibles, *i.e.* matériels *low-cost* commercialisés auprès du grand public; 5) adaptables, modulables et donc réparables ou réutilisables; et 6) connectés, *i.e.* basés sur l'Internet des Objets (*Internet of Things*, IoT).

Les systèmes Cheap'Eau visent à produire des chroniques de données et/ou des alertes quant à la quantité et la qualité des EP dans les réseaux, les déversoirs d'orage, les ouvrages de gestion alternatifs des eaux pluviales et les milieux aquatiques récepteurs. L'objectif du projet Cheap'Eau est de démontrer la faisabilité et l'intérêt du concept de chaîne métrologique à bas-coûts.

Cheap'Eau vise également à structurer le marché en accompagnant notamment les futurs services utilisateurs (notamment les collectivités) dans la définition de leurs besoins. Ce cadrage des besoins permettra aux prestataires de services (suivi des ouvrages) ou de technologies (solutions de suivi) de mieux être en phase avec les attentes du marché.

Ces retombées sont un apport essentiel pour les collectivités, bureaux d'études et gestionnaires des systèmes d'assainissement afin de connaître et de diagnostiquer l'état de leurs dispositifs de gestion des EP. Cheap'Eau postule que ces systèmes constitueront un outil pertinent d'aide à la décision pour une gestion plus efficace des EP en territoires urbains et péri-urbains. Par exemple, des systèmes d'alerte à bas-coûts basés sur des grandeurs simples (hauteur d'eau ou présence d'eau) peuvent être installés dans de nombreuses techniques alternatives et alerter les gestionnaires en cas de fonctionnement anormal. Ils pourraient permettre également d'alimenter le diagnostic permanent des systèmes d'assainissement des collectivités. Ainsi de façon générale, nos objectifs pratiques et scientifiques sont :

- **D'évaluer les bénéfices de technologies bas-coûts, *open-source* et *IoT* en matière de gestion des eaux pluviales**, en testant/expérimentant des systèmes pour envisager leurs utilisations pratiques (scientifique ou opérationnelle) ;

- **Donner de la lisibilité sur ce qu'on peut attendre de ces systèmes métrologiques**, notamment par le biais de recommandations sur le choix du système d'acquisition et du capteur en fonction de son utilisation (qualité et fréquence des mesurages), de son installation, de son environnement (source d'énergie, réseaux à proximité) ;

- **Guider les personnes utilisatrices afin qu'elles tirent avantage de ces nouvelles technologies en fonction de leurs objectifs.** *Low-cost* ne veut pas simplement dire « faire à moindre coûts la métrologie classique » . Il faut profiter de cette technologie pour utiliser au mieux ces informations et en tirer toutes leurs potentialités : accès à la donnée en temps réel ; définition d'alertes pour le suivi d'ouvrages ; partage de données entre différents services de la collectivité ; partage de la donnée avec le grand public pour l'informer. Cheap'Eau vise à produire des tutoriels et une réflexion sur la construction de formations dédiées à la surveillance bas-coûts. **C'est un changement de paradigme pour le suivi des ouvrages**.

Afin d'atteindre ces objectifs et de structurer le travail, Cheap'Eau a mêlé étroitement les compétences de recherche et les compétences opérationnelles. Le programme est structuré (Tableau 1) autour de quatre équipes de recherche (EVS, INRAE, INSA, ISA), d'une startup (Ægir), d'une association scientifique et technique (Graie), d'une collectivité (La Métropole de Lyon) avec l'appui et la participation active de l'AERMC et de l'OTHU. Cheap'Eau a collaboré également étroitement avec le projet SETIER (porteur INRAE) focalisé sur la métrologie *low-cost* des stations d'épuration et leur efficacité.

Organisation	Thématiques
EVS-Université Lyon 2	Hydrologie, géomorphologie fluviale, métrologie, électrotechnique
INRAE – Riverly	Métrologie physico-chimique et méthodologie de surveillance des systèmes fluviaux
INSA Deep	Hydrologie urbaine (techniques alternatives de gestion des eaux pluviales) – métrologie.
ISA	Interfaces & biosensors
Graie, Métropole Grand Lyon	Animation, valorisation, transfert opérationnel + mise à disposition de sites expérimentaux et appui du réseau des équipes OTHU
ÆGIR	Start-up qui accompagne en effet les professionnels de l'eau (régies publiques et privées, bureaux d'études, instrumentistes…) dans leur réflexion autour de l'instrumentation et la mise en conformité des systèmes d'assainissement

Tableau 1 *: Répartition des tâches parmi les laboratoires et bureau d'études*

Cheap'Eau est organisé selon cinq tâches *(avec précision de l'équipe qui coordonne la tâche)* ***:***

T0/ EVS et Graie : Gestion de projet : avancement des tâches et communication avec l'Agence de l'Eau RMC ;

T1/ EVS : Choix des grandeurs à mesurer : quels besoins, pour quels objectifs ? Collecte des attentes des opérationnels, choix des systèmes (Graie - Ægir) ;

T2/ DEEP : Choix des systèmes et développements des solutions techniques à bas-coûts les plus adaptées aux objectifs T1 ;

T3/ ISA : Tests en milieux contrôlés (laboratoire, bungalow OTHU) ;

T4/ RiverLy : Évaluation sur le terrain (OTHU, Eco-Campus) en comparaison avec les systèmes traditionnels ;

T5/ Graie : Transfert des résultats et valorisation opérationnelle.

IDENTIFICATION DU PROJET

Titre du projet :	**CHEAP'EAU – SOLUTIONS INNOVANTES À BAS-COÛT POUR LE SUIVI DES SYSTEMES DE GESTION DES EAUX URBAINES**
Coordinateur de projet :	OLDRICH NAVRATIL – EVS Univ. LYON 2
Courriel	Oldrich.Navratil@univ-lyon2.fr
Durée du projet	50 mois
Date de rédaction	Janvier 2024
Période faisant l'objet du rapport d'activité	Décembre 2019 à Février 2024

PERMANENTS ET DOCTORANTS

Organisation	Nom	Prénom	Thématiques	Courriel
agence de l'eau RHÔNE MÉDITERRANÉE CORSE établissement public de l'État	Abad	Fabien	Innovations et Assainissement - Chef du département	fabien.abad@eaurmc.fr
	Arnault	Camille	Innovations et Assainissement	camille.arnault@eaurmc.fr
	Lagarrigue	Céline	Innovations et Assainissement	
ÆGIR	Beguin	Priscille	Hydrologie Urbaine	priscille.beguin@aegir-ingénierie.fr
graie OTHU	Bacot	Laëtitia	Animation, valorisation, transfert opérationnel	laetitia.bacot@graie.org
GRANDLYON la métropole	Caltran	Hervé	Responsable Gestion des patrimoines	hcaltran@grandlyon.com
UNIVERSITÉ LUMIÈRE LYON 2 UNIVERSITÉ DE LYON / EVS UMR 5600 UNIVERSITÉ DE LYON	Navratil	Oldrich	Hydrogéomorphologie - Métrologie	oldrich.navratil@univ-lyon2.fr
	Perret	Franck	Technicien en électrotechnique	franck.perret@univ-lyon2.fr
	Ribeiro Marques Da Silva	Paulo Vitor	Hydrologie Urbaine (PhD) - Métrologie	pribeiromarq@student.unimelb.edu.au
INSA deep LYON	Bertrand-Krajewski	Jean-Luc	Hydrologie Urbaine (techniques alternatives de gestion des eaux pluviales) - Métrologie	jean-luc.bertrand-krajewski@insa-lyon.fr
	Cherqui	Frédéric	Hydrologie Urbaine (techniques alternatives de gestion des eaux pluviales) - Métrologie	frederic.cherqui@insa-lyon.fr
	Kim	Boram	Hydrologie Urbaine (techniques alternatives de gestion des eaux pluviales) - Métrologie	boram.kim@insa-lyon.fr
	Zhu	Qingchuan	Hydrologie Urbaine (PhD) - Métrologie	qingchuan.zhu@insa-lyon.fr

	Gisi	Maria F. S.	Hydrologie Urbaine (PhD) - Métrologie	maria.gisi@insa-lyon.fr
	Walcker	Nicolas	Technicien sites OTHU - Métrologie	nicolas.walcker@insa-lyon.fr
	Etienne	Noémie	Projet Telesphore (PhD)	noemie.pernin@insa-lyon.fr
INSTITUT DES SCIENCES ANALYTIQUES	Fakri-Bouchet	Latifa	Développement de capteur micro-onde	latifa.bouchet@univ-lyon1.fr
	Jaffrezic-Renault	Nicole	Développement de capteur micro-onde	nicole.jaffrezic@univ-lyon1.fr
	Jose	Catherine	Fabrication capteurs micro-onde - plateforme électronique	catherine.jose@univ-lyon1.fr
INRAE RiverLy	Namour	Philippe	Chimie - Métrologie	philippe.namour@laposte.net
INRAE UR REVERSAAL	Clément	Rémi	Projet SETIER : capteur *low-cost* STEP	remi.clement@inrae.fr

NON-PERMANENTS EN LIEN AVEC CHEAP'EAU

Organisation	Poste	Nom	Prénom	Travail	Année(s)
ISA	Stagiaire	Bajaj	Omar	Test des capteurs micro-onde sur les échantillons d'eau	2023
EVS	Ingénieur	Pouilloux	Jérôme	Développement de la plateforme opendataeau.org	2022-2023
EVS	Stagiaire - Ingénieur d'études	Bourjaillat	Bastien	Développement et installation de capteurs ; Arduino	2021-2022
INSA Deep	Ingénieur d'études	Cherif	Ilane	Rédaction des articles (TSM, HarwdareX) et rapport final	2023
EVS	Stagiaire	Bourgeau	Fanny	Biopotentiel ; Science participative	2023
EVS	Stagiaire	Mourelon	Robin	Biopotentiel ; Ouvrages de gestion des eaux en ville	2023
INRAE/EVS	Stagiaire	Anquez	Benoît	Turbidimètre ; Tutoriel TTN ; Arduino	2021
INSA Deep/EVS	Ingénieur d'études	Lord	Lionel	Développement capteurs *low-cost* ; Arduino ; Installation	2020
INRAE	Ingénieur d'études	Castro	Julien	Mesure de niveau d'eau par ultrason ; Arduino	2020- 2021
INSA Deep	Elève PIRD	Armand	Nicolas	Mesure de niveau d'eau par ultrason ; Arduino	2022
INSA Deep	Elève PIRD	Volff	Stefan	Mesure de niveau d'eau par ultrason ; Arduino	2022
INSA Deep/EVS	Stagiaire	Coladonato	Sara	Tutoriel Vidéo Niveaudo	2022
ISA	Stagiaire	Adewolu	Adam	Développement des capteurs micro-onde	2020-2021
EVS	Stagiaire	Sabrina	Johana	Test des capteurs ultrason	2020

SYNTHESE DE LA PHILOSOPHIE « CHEAP'EAU »

LES ENJEUX METROLOGIQUES ACTUELS

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 entrainent 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 OTHU-Agence de l'Eau RMC (2020-2023), des entretiens et des enquêtes ont été menés auprès de 35 personnes impliquées dans la gestion de l'eau (collectivités et privés). Ces travaux ont mis en évidence une connaissance limitée du potentiel de ces nouveaux systèmes métrologiques par les services opérationnels. Aujourd'hui, beaucoup les ignorent et ne comprennent ni 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 personnes opérationnelles. 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 ? Ce rapport propose des éléments de réponse à ces questions.

La métrologie environnementale a pour objectif d'informer sur le fonctionnement des hydrosystèmes, i.e. les cours d'eau, les plans d'eau, lacs 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.

LES HYDROSYSTEMES SONT COHERENTS, STRUCTURES 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 (Mc Clain *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 nécessite un réseau métrologique déployé dans l'espace et dans le temps de manière appropriée.

LES LIMITES DE LA METROLOGIE 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 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. Pour un site donné, et en suppléments des systèmes déjà placés, une proposition serait d'installer des capteurs moins onéreux permettant de combler une partie des zones d'ombre sur de

l'hydrosystème suivi. Ce déploiement d'appareils *low-cost* permet d'optimiser la couverture spatiale sans augmenter le cout lié au matériel.

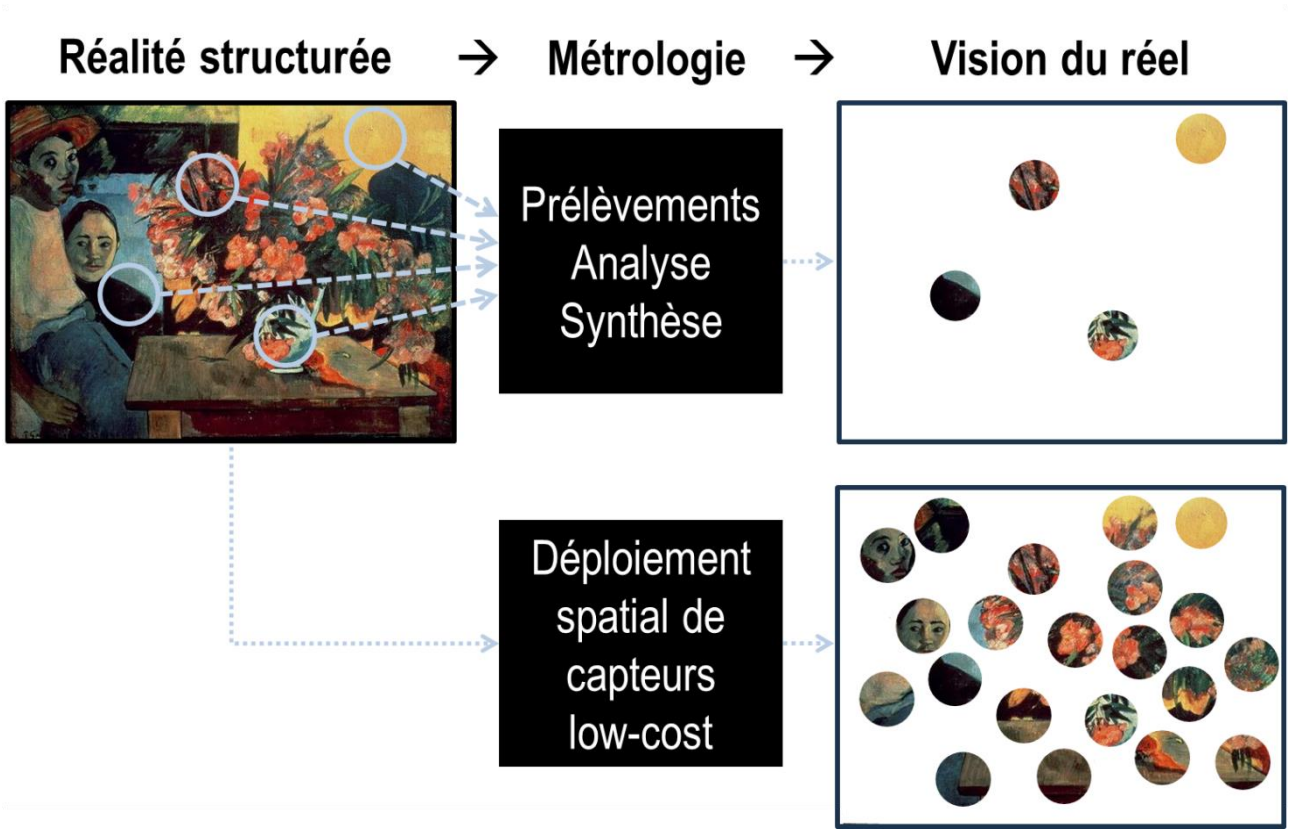


Figure 1 : *Réduction drastique d'une réalité structurée opérée par la métrologie environnementale actuelle et ses protocoles d'analyse ponctuels. A partir d'un tableau (ici Paul Gauguin, Te tiare farani, 1891, Musée Pouchkine, Moscou) la pratique d'observation traditionnelle consiste à mesurer quelques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

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.

LIMITES DE LA METROLOGIE ACTUELLE

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).

VERS UN NOUVEAU PARADIGME D'OBSERVATION DES HYDROSYSTEMES

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. Maitriser complètement la chaine 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 parties prenantes 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 de concevoir, de fabriquer et d'utiliser cette chaîne de mesure. Pour l'opérationnel•le ou l'exploitant•e, il s'agira de connaitre l'offre de capteurs et ses distributeur•trice•s, d'avoir une donnée pertinente, fiable et à un coût raisonnable.

TACHE 0 : GESTION DE PROJET

Objectif : Veiller à l'avancement des tâches du projet et interface avec l'Agence de l'Eau RMC

Le chef de projet (EVS) a été accompagné tout au long du programme par un comité de pilotage (CoPil) constitué des responsables de tâche du projet et assisté d'un comité technique constitué d'opérationnels de Lyon Métropole et d'ÆGIR. Ce CoPIL a été animé par le Graie, sept réunions ont eu lieu (27/03/20 – 12/06/20 – 18/12/20 – 26/02/21 – 18/06/21 – 25/03/22 – 13/11/2023 – 07/02/2024) en plus de la réunion de lancement, en présence d'expert•e•s extérieurs si nécessaire. Ces réunions ont été l'occasion de discuter des résultats, définir les profils de postes des non permanent•e•s (IE/Master/Stages), des progrès du projet et d'adopter/phaser les objectifs.

Le programme a été perturbé par plusieurs imprévus. Tout d'abord, la pandémie de Covid-19 et les périodes de confinement imposées du 13 mars au 11 mai, et du 30 octobre au 1 décembre 2020 ont considérablement réduit les interactions entre partenaires, la rencontre avec les gestionnaires, le travail de laboratoire et l'installation de prototypes sur le terrain, ralentissant d'autant l'avancement global du projet. Nous estimons le retard à 18 mois sur l'échéancier du projet.

D'autre part, la démission de Lionel Lord, ingénieur en CDD sur le projet, pour cause de limite de cumul d'emploi-retraite, a nécessité de relancer la procédure de recrutement en juillet 2020. Julien Castro a été embauché pour le remplacer du 1er novembre 2020 au 30 octobre 2021, puis remplacé par Bastien Bourjaillat du 1er octobre 2021au 31 août 2022 et enfin Ilane Cherif du 1er mars au 31 décembre 2023.

La mise en place de réunions virtuelles régulières depuis le confinement, les « Cafés Cheap'Eau » (treize cafés en visio organisés sur 2020, sept cafés en 2021, cinq en 2022 et trois en 2023), a permis :

- de maintenir la dynamique du consortium
- de suivre la progression du travail réalisé
- d'inviter des partenaires et autres parties impliquées à discuter des résultats (Métropole de Lyon, UCBL LEHNA, Urbasense, Université Côte d'Azur (UCA)…)
- Elles ont également permis de communiquer régulièrement sur nos avancées avec l'Agence de l'eau RMC.

Ces cafés ont été complétés tout au long de cette période par des rendez-vous réguliers entre les responsables des tâches pour l'encadrement de l'ingénieur d'études et la coordination globale du projet.

Enfin, toujours dans un objectif de partage et concertation, un espace partagé d'échange d'informations internes a été mis en place (Stratus, INRAE puis Teams).

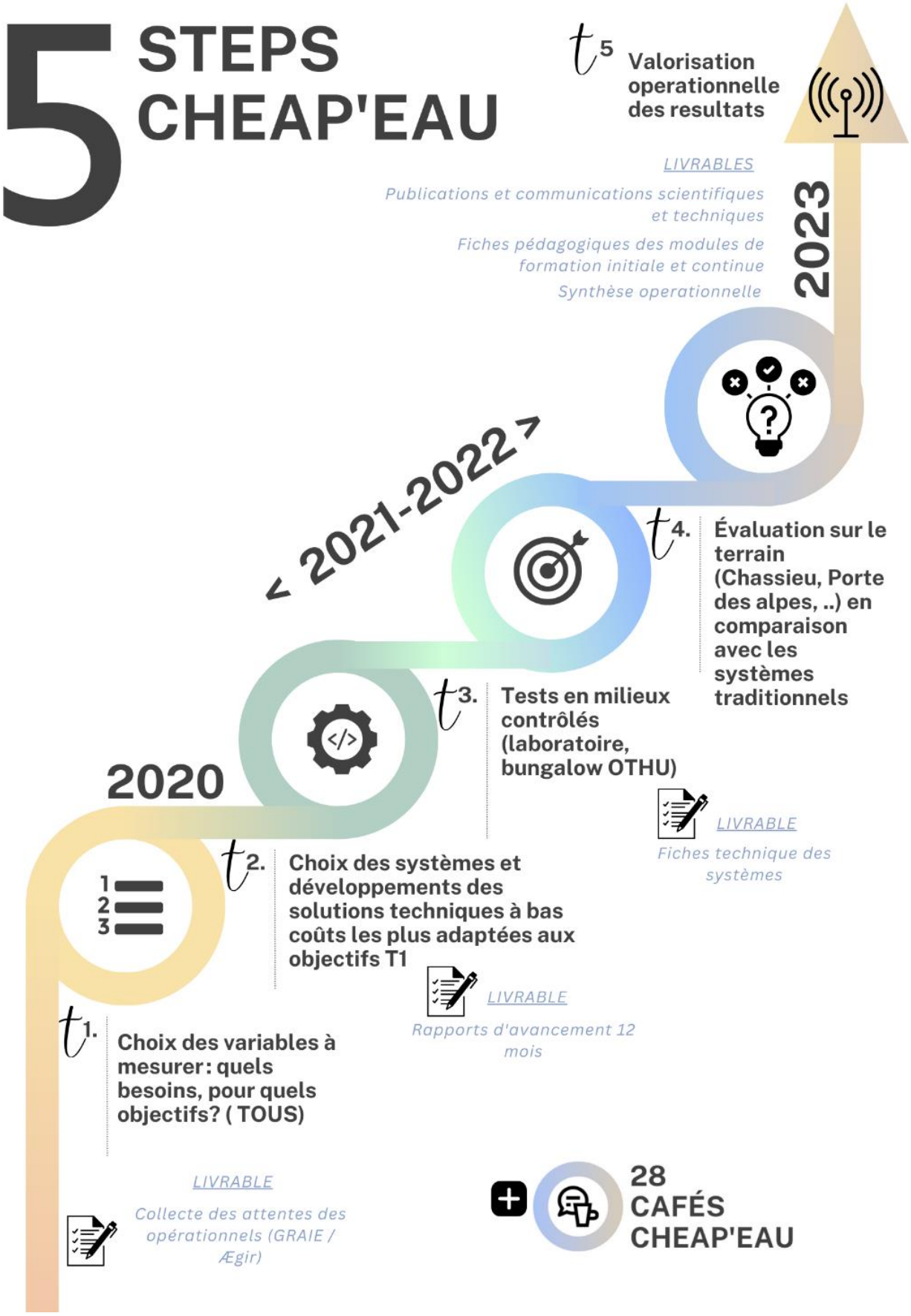


Figure 2 : *Synthèse visuelle de l'organisation de Cheap'Eau*

TACHE 1 : CHOIX DES VARIABLES A MESURER

Objectif : Identifier les besoins à partir d'une collecte des attentes des opérationnel•le•s, puis choisir les systèmes à développer à partir d'une analyse multicritère

En concertation avec les gestionnaires, T1 collecte les besoins des opérationnel•le•s, et choisit les systèmes à développer à partir d'une analyse multicritère intégrant : i) *les enjeux métrologiques*, ex. la connaissance/étude d'un ouvrage ou d'un milieu, respect des demandes réglementaires, amélioration du bien-être urbain, optimisation de la tournée du personnel technique ; ii) *les personnes utilisatrices*, ex. collectivités (de tailles différentes), gestionnaires, laboratoires de recherche, bureaux d'études, associations ; iii) *les systèmes/milieux à suivre*, ex. bassin d'infiltration, de rétention, autres techniques alternatives à la source (ex. : tranchées d'infiltration, toitures végétalisées, etc.), réseau d'EP, DO, rivière ou autres milieux aquatiques ; iv) *les paramètres physiques à mesurer*, ex. : température, niveau d'eau ou seuil, détection de présence fréquentation de sites, conductivité, turbidité, pH, couleur, conductivité, précipitation, vidéo ; v) *le niveau de surveillance exigé*, ex. : fine pour la production de chroniques hydrométriques (ex. volume rejeté), robuste pour la production d'alertes par dépassement de seuil ou rejet.

Nous avons mis en place en juin 2020 une enquête en ligne auprès des gestionnaires. Son élaboration en appui sur le consortium piloté par le Graie et ÆGIR, a été menée en relation avec le projet Setier afin d'éviter les redondances. Nous avons eu un très faible taux de participation (diffusion Graie : 1%, seulement 35 réponses sur 3500 envois plus de nombreux relais partenaires). Outre la longueur du questionnaire, ce faible retour peut s'expliquer par la faible connaissance de ces solutions de suivi (systèmes à bas-coûts, IoT, et open source) et de leur potentialité. L'échantillon collecté est tout de même intéressant car il touche l'ensemble des personnes visées (collectivités, bureaux d'études, services de l'État, et quelques autres prestataires) sur l'ensemble de la France et notamment 49% de collectivités.

D'autre part, les réponses montrent globalement un faible engouement des collectivités pour la réalisation des systèmes internes : les collectivités ne veulent pas fabriquer leurs systèmes de suivi. Par contre, elles préfèrent être utilisatrices de ces systèmes. Quelques collectivités se sont montrées prêtes à tester les premiers prototypes : SERA Orléans - groupe SUEZ ; Roannaise de l'Eau ; CAPI Communauté d'Agglomération Portes de l'Isère.

Cheap'Eau peut intervenir en tant qu'aide et conseil auprès des collectivités pour une meilleure définition de leurs besoins de métrologie des eaux pluviales (technique de mesure, communication, gamme et fréquence de mesure). Cette aide leur permettra de choisir parmi les nombreux fournisseurs en fonction des milieux à étudier et des objectifs fixés (eg. suivi d'ouvrage, alerte).

Pour accompagner les collectivités dans les années à venir, nous avons initié un document de synthèse (sous forme de tableur) permettant d'affiner le choix d'un système de suivi vis-à-vis des besoins des opérationnels, et selon différents critères combinant les : 1) enjeux métrologiques ; 2) les personnes utilisatrices ; 3) les milieux à suivre ; 4) les paramètres physiques à mesurer ; et enfin 5) les niveaux de surveillance exigés. Ce document permet également de situer nos différents systèmes IoT, *low-cost* et open source, réalisés dans le cadre de ces besoins.

Pour compléter et approfondir ce travail d'enquête, Ægir a mené cinq entretiens ciblés et ouverts auprès des gestionnaires et bureaux d'étude. Compte tenu de la faible connaissance des solutions bas-coûts et connectées et de l'absence de réglementation pour le suivi des eaux pluviales, contrairement au suivi des STEP, seuls des entretiens individuels ont permis d'avoir des informations plus précises sur leurs besoins et l'état des connaissances des collectivités/BE. Les besoins sont très peu formalisés, un travail important de Cheap'Eau a donc été de montrer quelles nouvelles possibilités peuvent offrir ces systèmes. Les besoins exprimés par les répondant•e•s se sont principalement orientés sur les aspects quantitatifs des eaux pluviales ; la qualité de l'eau n'étant pas (ou peu) présente. Dans ce contexte, nous avons choisi d'orienter en premier lieu nos efforts pour les tâches 2, 3 et 4 sur une variable d'intérêt commun avec les laboratoires : la mesure du niveau d'eau, incluant aussi la détection de seuil ou d'événement de déversement.

LES ATTENTES ET PERCEPTIONS DE LA METROLOGIE *LOW-COST* PAR LES GESTIONNAIRES

Sur la base des 35 réponses au questionnaire en ligne (Figure 3) et des 5 entretiens individuels menés, les **besoins** exprimés par les répondant•e•s, organisés par grands thèmes, sont principalement :

- **Les systèmes/milieux à suivre** : les besoins principalement exprimés dans l'enquête sont en premier pour les STEP, ensuite les DOs et le réseau, puis les techniques alternatives. Ce besoin est clairement lié aux demandes de suivi règlementaire fortement axés sur les STEP, réseaux et DO. Pour les répondants connaissant les capteurs *low-cost*s des suivis complémentaires sur le sol et l'impact milieu sont envisagés. Au cours des entretiens, le besoin métrologique était clairement sur le réseau et les DOs.

- **Les enjeux métrologiques** : peu de retours dans l'enquête, pour les répondant•e•s connaissant les capteurs *low-cost* ; un enjeu sur la spatialisation de la donnée et la multiplication du nombre de points semble ressortir. Certains envisagent également le low cost en remplacement de campagnes de mesure ponctuelles. Au sein des entretiens le caractère non intrusif des capteurs pour simplifier l'entretien a été relevé. L'idée de mieux comprendre les réseaux à large échelle en déployant plus de capteurs dans le linéaire pour avoir une vision d'ensemble de la dynamique des systèmes est clairement ressortie. L'intérêt de solution autonome en énergie qui permettrait de faire une transmission à leur supervision est également souligné. La sécurité et l'envoi simple des données est primordial pour une exploitation efficace selon les entretiens.

- **Les paramètres physiques à mesurer** : les besoins sont orientés sur les aspects de suivis quantitatifs des EP ; la qualité de l'eau n'étant pas (ou peu) présente.

- **Les personnes utilisatrices potentielles** : plutôt les collectivités de grandes taille et bureaux d'études selon les répondant•e•s au questionnaire, également les instrumentistes et certain•e•s délégataires selon les entretiens.

- **Le niveau de surveillance exigé pour ces capteurs low cost :** les besoins exprimés, pour les collectivités par le biais de l'enquête et confirmés par les entretiens, sont d'obtenir des données justes et fidèles.

- **Coûts pertinents pour un système de mesure low cost** : grâce aux entretiens une seule estimation fournit ~300€

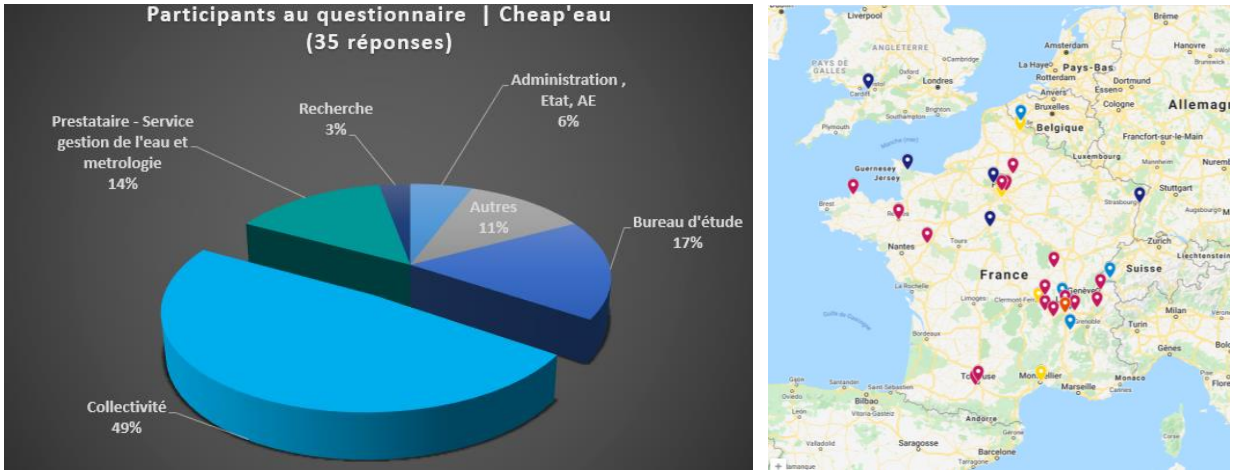


Figure 3 : *Diagramme représentant les secteurs d'activité et carte de localisation des 35 participants au questionnaire Cheap'Eau.*

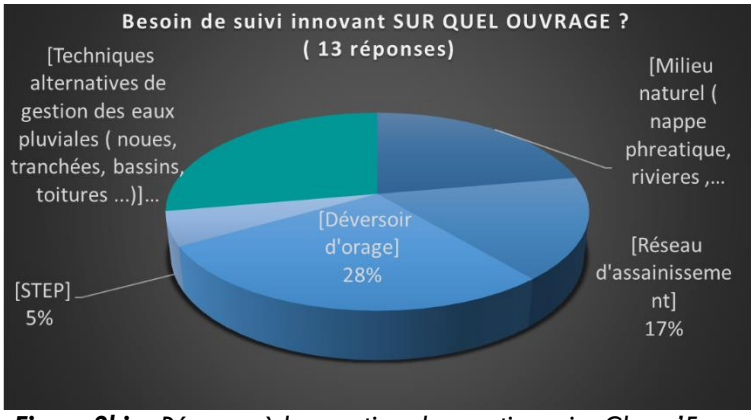


Figure 3bis : *Réponse à la question du questionnaire Cheap'Eau :*
Quels types d'ouvrages sur votre système d'assainissement souhaiteriez-vous suivre en priorité avec des dispositifs innovants ?

À RETENIR DE L'ENQUETE & DES ENTRETIENS

Une chaine de mesure *low-cost*, au regard de l'analyse croisée, devrait :

- être peu encombrante
- être autonome en énergie.
- fournir des données justes et fiables
- être étanche et solide pour assurer une bonne durée de vie
- permettre un stockage local de la donnée en cas de problème de transmission
- avoir un support facile à mettre en place sur le terrain
- avoir un système de transmission vers un serveur sécurisé et centralisé pour faciliter la récupération des données par les supervisions
- permettre une acquisition toutes les 1 à 10 min
- avoir un coût inférieur à 300€

Les entretiens font ressortir une faible maitrise des potentiels que représentent les données métrologiques de terrain. Aujourd'hui les instrumentations en place sont sous-exploitées. Le succès du développement de solutions connectées et bas-coûts d'instrumentation sera lié à la valeur ajoutée des données qu'elles produiront. Or beaucoup d'exploitant•e•s connaissent mal leur utilité et leur potentiel.

L'enjeu majeur de la transmission au marché des résultats du projet Cheap'Eau semble être la formation des exploitant•e•s à l'exploitation de la métrologie. L'enjeu majeur de la transmission aux opérationnel•le•s des résultats du projet Cheap'Eau semble être :

- <u>De montrer quelles nouvelles possibilités peuvent offrir ces systèmes</u> : montrer leur utilité, clarification des apports possibles des capteurs *low-cost* à une meilleure gestion des systèmes d'assainissement et souligner leurs avantages (en termes de données, d'installation, de maintenance et d'informations produites).

- <u>Plus généralement</u> : il semble selon les entretiens qu'une meilleure formation des exploitant•e•s à l'exploitation de la métrologie et des données fournies contribuerait à plus facilement transférer les résultats du programme. Et à intégrer cette « innovation » dans la démarche des opérationnel•le•s.

TACHE 2 : CHOIX DES SYSTEMES ET DEVELOPPEMENTS TECHNIQUES

Objectif : Choisir et développer des systèmes métrologiques à bas-coûts adaptés aux objectifs définis en tâche T1

Cette tâche vise à définir et concevoir des systèmes sélectionnés suivant l'expertise et les compétences des laboratoires (Cherqui *et al.*, 2015; Lepot *et al.*, 2016; Namour *et al.*, 2012; Navratil *et al.*, 2011) et validés par le groupe de coordination du projet (T0). Chaque système d'acquisition prototype (système ouvert Arduino®) est composé d'un capteur (récepteur sensible et transducteur), d'un microcontrôleur et d'un système de communication adapté aux objectifs (ex. Wifi, Bluetooth, radio, LoRa), selon les performances requises (ex : fréquence d'acquisition, traitement du signal en temps réel ou non) et le réseau disponible. Une solution d'encapsulage et de source d'énergie a été proposée pour chaque système, puis testée en laboratoire (T3) et sur le terrain (T4) et ajustée si nécessaire au fil du projet.

Les différents partenaires de Cheap'Eau ont priorisé le développement de systèmes de mesure liés à des paramètres très souvent étudiés dans le domaine de l'eau : la hauteur d'eau, la température, l'humidité du sol. En parallèle, le consortium a constitué une liste détaillée des capteurs *low-cost* disponibles commercialement pour différents types de mesure (hauteur d'eau, humidité relative de l'air, humidité dans le sol, pH, conductivité, pluie, turbidité, débit, vitesse du vent et rayonnement solaire). Le choix des capteurs *low-cost* pour le suivi hydro-météorologique a requis une attention toute particulière dans le cadre de la thèse de Qingchuan Zhu (cf. Fiche 1 ; 2 et 9).

Concernant la hauteur d'eau, plusieurs prototypes ont été testés avec des mesurages de hauteur d'eau par ultrasons (avec le test de deux modèles), par laser (un modèle), ou par pression (deux modèles). Certains de ces tests ont été réalisés en étroite collaboration avec des scientifiques australiens de l'Université de Melbourne (Cherqui *et al.*, 2020). Le développement du système de mesure de hauteur d'eau a été poursuivi à l'aide du travail des élèves PIRD, leur prototype a été amélioré par la suite pour donner le dispositif Niveaudo. La mesure de distance se fait par ultrason en se basant sur les résultats des essais précédents qui ont montré la fiabilité et l'avantage de cette méthode (cf. Fiche 3). L'onde sonore se déplaçant à une vitesse dépendante du milieu de propagation, une mesure de la température de l'air ambiant est nécessaire au même pas de temps que la mesure de distance. La fréquence d'acquisition est définie par l'opérateur•tric•e. Ainsi, le système a été supplémenté d'une sonde température *low-cost*. Le coût global d'un système Niveaudo était inférieur à 200 € lors de son développement, mais les périodes d'inflation de 2022 et 2023 ont fait augmenter le prix jusqu'à 250€ TTC. Le premier prototype Niveaudo a été testé et évalué sur le terrain et comparé à des sondes commerciales traditionnelles (cf. Fiche 12).

Des premiers systèmes adaptés au suivi de l'infiltration dans le sol ont été développés et testés sur site, ils reposent sur la mesure de température et d'humidité relative à différentes profondeurs du sol et sur le suivi du volume infiltré en lien avec des épisodes pluvieux.

Un prototype de centrale d'acquisition (cf. Fiche 6) est actuellement finalisé pour d'accueillir tous type d'éléments électroniques et capteurs utilisés dans le cadre de Cheap'Eau (Tableau 1). Une carte par système est donc encapsulée dans un tube PVC (cf. Fiche 9) avec le reste des capteurs et l'antenne LoRaWAN. Le boîtier a notamment fait ses preuves pendant un an sur un terrain en montagne (avec des écarts de température très importants ; d'humidité et d'ensoleillement) et assurant le fonctionnement du système sur la longue durée. Actuellement, le circuit imprimé est doté d'un système d'auto-réveil se reposant sur la fonction "alarme" d'un module RTC (*Real-Time Clock*) directement intégré dans le circuit imprimé. Cela permet de réduire la consommation électrique à 47µA lors des phases d'attente entre deux acquisitions, pour une autonomie d'un mois sans panneau solaire. Nos appareils utilisent généralement deux cartes principales : Arduino MKR WAN 1310 et MKR SD Shield. Elles permettent de transmettre les données via un réseau *low-cost* (borne LoRa TTN installée au laboratoire) et d'enregistrer les données sur une carte SD.

Un travail a également été accompli concernant la mesure de la turbidité par plusieurs stages (ISA, INRAE, EVS) et actuellement dans le cadre de la thèse de Maria Gisi et celle de Paulo Ribeiro (cf. Fiche 4). La phase de prototypage de sonde de turbidité est terminée et plusieurs modèles ont été construits puis installés à plusieurs points au niveau de la commune de Grézieu-la-Varenne, ainsi qu'en Australie dans la banlieue de Melbourne.

Enfin, le projet Cheap'Eau propose d'innover dans la mesure de la qualité de l'eau en proposant de développer des capteurs basés sur la résonance d'ondes micro-ondes électromagnétiques, et permettant de détecter la signature diélectrique des polluants présents dans l'eau.

Cette tâche fait référence aux fiches techniques n°1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 8 :

1/ État de l'art des capteurs à faible coût en hydrologie urbaine (T2)

2/ Tests et évaluation de capteurs météorologiques à bas coûts (T2 + T3)

3/ Standardiser le test et la sélection de capteurs de niveau d'eau *low-cost* (T2 + T3)

4/ Un capteur de turbidité de lave-vaisselle pour mesurer la turbidité : tests en laboratoire (T2 + T3)

5/ Tests en laboratoire de capteurs micro-ondes *low-cost* pour mesurer la qualité de l'eau (T2 + T3)

6/ Une centrale d'acquisition environnementale *low-cost*, open source, robuste et connectée (T2 + T3)

7/ Communication des données en ligne (T2 + T3)

8/ Des arbres pour surveiller les ouvrages de gestion des eaux pluviales (T2 + T4)

TACHE 3 : TESTS EN MILIEUX CONTROLES

Objectif : Tester en milieu contrôlé les systèmes développés en T2

Cette tâche vise l'installation d'une plateforme de test en milieu contrôlé (laboratoire et/ou bungalow de surveillance des EP développé à l'OTHU) des capteurs et des chaînes de mesure, et la définition des protocoles. Leur reproductibilité a été ainsi testée. Cette tâche s'est appuyée sur les moyens techniques et humains mis à disposition par chaque partenaire (ISA, Irstea, laboratoire INSA-DEEP, EVS et plateforme de recherche CNRS OMEAA). Elle nous a fourni des éléments techniques de fonctionnement des systèmes (ex. gammes de mesure) et un comparatif entre ces systèmes à bas-coûts et des systèmes traditionnels plus coûteux.

Différentes sondes de hauteur d'eau ont été testés en réalisant et utilisant un banc de tests de capteurs de hauteurs d'eau en partenariat avec des scientifiques australiens (Cherqui *et al.*, 2020) : le banc a déjà permis de tester plusieurs capteurs de hauteur d'eau et les premiers résultats ont été valorisés par un article dans une revue internationale (Cf. Fiche n°4). Ces capteurs ont également été testé par Johana Sabrina (stage de 2 mois) puis à la Métropole de Lyon dans le cadre du projet Artisan.

Les tests du capteur de turbidité SEN0189 ont été effectués par deux doctorants, Maria Gisi et Paulo Ribeiro (cf. Fiche 5) au laboratoire EVS/INSA DEEP, dans le cadre d'une collaboration avec l'Université de Melbourne. Ce capteur généralement utilisé dans des lave-vaisselles est produit en grande quantité, ce qui permet de s'en procurer à un faible coût. Il semble être à ce jour le seul capteur à bas-coût largement commercialisé et prometteur pour un usage opérationnel dans le domaine de l'eau.

Les capteurs micro-onde CSRR sont en phase de test à l'ISA afin de déterminer leur capacité à détecter des particules contenues dans des échantillons d'eau (→ quelles espèces chimiques ?). Avant de le placer sur le terrain dans une rivières ou dans une conduite, le capteur a besoin d'être d'encapsulé pour le rendre étanche et le plonger dans l'eau. À terme, le but serait de construire un système aussi robuste que les autres dispositifs Cheap'Eau pour l'installer sur le terrain et effectuer des mesurages en continu. Ces capteurs pourraient substituer l'utilisation de sondes de pH commerciales puis pousser l'analyse de l'eau encore plus loin, en identifiant les polluants et leur concentration via des algorithmes de traitement par IA.

Cette tâche fait référence aux fiches techniques n°2, 3, 4, 5, 6, 7 et 9 :

2/ Tests et évaluation de capteurs météorologiques à bas coûts (T2 + T3)

3/ Standardiser le test et la sélection de capteurs de niveau d'eau *low-cost* (T2 + T3)

4/ Un capteur de turbidité de lave-vaisselle pour mesurer la turbidité : tests en laboratoire (T2 + T3)

5/ Tests en laboratoire de capteurs micro-ondes *low-cost* pour mesurer la qualité de l'eau (T2 + T3)

6/ Une centrale d'acquisition environnementale *low-cost*, open source, robuste et connectée (T2 + T3)

7/ Communication des données en ligne (T2 + T3)

9/ Validation des pluviographes à bas coût (T3 + T4)

TACHE 4 : ÉVALUATION SUR LE TERRAIN EN COMPARAISON AVEC LES SYSTEMES TRADITIONNELS

Objectif : Évaluer chacun de ces systèmes à bas-coûts sur les différents sites OTHU et Eco-Campus

Les essais sur le terrain ont démarré de manière anticipée en 2020 pour 1) identifier et lever au plus tôt les contraintes de terrain ; 2) anticiper la réduction des opportunités à cause des situations de télétravail ; et 3) profiter d'opportunités de mise en œuvre d'expérimentation sur le terrain pour coupler les capteurs commerciaux avec des systèmes de suivi à bas-coût Cheap'Eau.

Le suivi des dispositifs Cheap'Eau et l'installation de nouveaux systèmes principalement sur la métropole lyonnaise tout au long du projet a permis de prouver leur robustesse dans le temps. Cette longévité est illustrée sur la Figure 4 ci-dessous, présentant quelques sites d'études mentionnés dans le Tableau 2.

Type de mesurage	Objectifs généraux	Localisation des systèmes	Paramètres physiques mesurés par le système	Capteur choisi (type et références)	Prix du capteur choisi
Niveau d'eau, système « Niveaudo »	Mesurage du niveau d'eau dans les lacs, ouvrages et aménagements de gestion des eaux pluviales	- Bassin de rétention Chassieu OTHU - 3 lacs de gestion des eaux pluviales à Porte des Alpes - 5 noues Gerland (2 avec Sig-Orange + 3 sans connectivité) - 1 point de mesure sur la rivière La Chaudanne	Hauteur d'eau	Capteur Ultrason (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	- Arbre - Centre-ville - Arbre - Campus Doua - Arbre étang 8vis – Doua LEHNA - Arbre - Porte des Apes	Tension au niveau du phloème et du xylème	Vis électrodes	5€
Qualité de l'eau	Détection des particules en suspension dans l'eau	Rivières sur Grézieu-la-Varenne : - Le Mercier - Le Ratier - La Chaudanne	Turbidité	Capteur optique de turbidité (SEN0189)	12€
Station météo	Suivi météorologique	- Toiture végétalisée (OTHU)	Pression atmosphérique	Sonde de pression et de température (BME280)	~5€
			Température de l'air		

			Humidité relative de l'air et température	Hygromètre / thermomètre (DHT22)	~5€
			Vitesse et direction du vent	Anémomètre (WH-SP-WS01) + Anémoscope (WH-SP-WD)	~20€ + ~20€
			Rayonnement solaire	Pyranomètre (JXBS-3001-ZFS)	~100€
Pluviométrie (Zhu, 2023)	Complément de la station météo	- Toiture végétalisée (OTHU)	Précipitation	Pluviomètre optique (RG-15)	~80€
				Pluviomètre à auget (WH-SP-RG)	~15€
Géophone*	Analyse du transport par charriage	- Canal de Miribel – Crépieux - Canal de Miribel – Jons - Canal de Miribel – Saint-Clair	Sismicité	Géophone (Géospace GS20DX)	~80€

Tableau 2 : *Synthèse des différents types de capteurs testés dans le cadre du projet Cheap'Eau. * appareil non-low-cost mais l'envoi des données est assuré par un microcontrôleur Arduino et une carte d'acquisition conçue pour le Cheap'Eau.*

La Figure 4a 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 biopotentiel, 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 sècheresse 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 4b). 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 libre, peuvent être reliés au réseau de capteurs *low-cost* afin de centraliser les données et profiter du parc d'appareils actuellement installés.

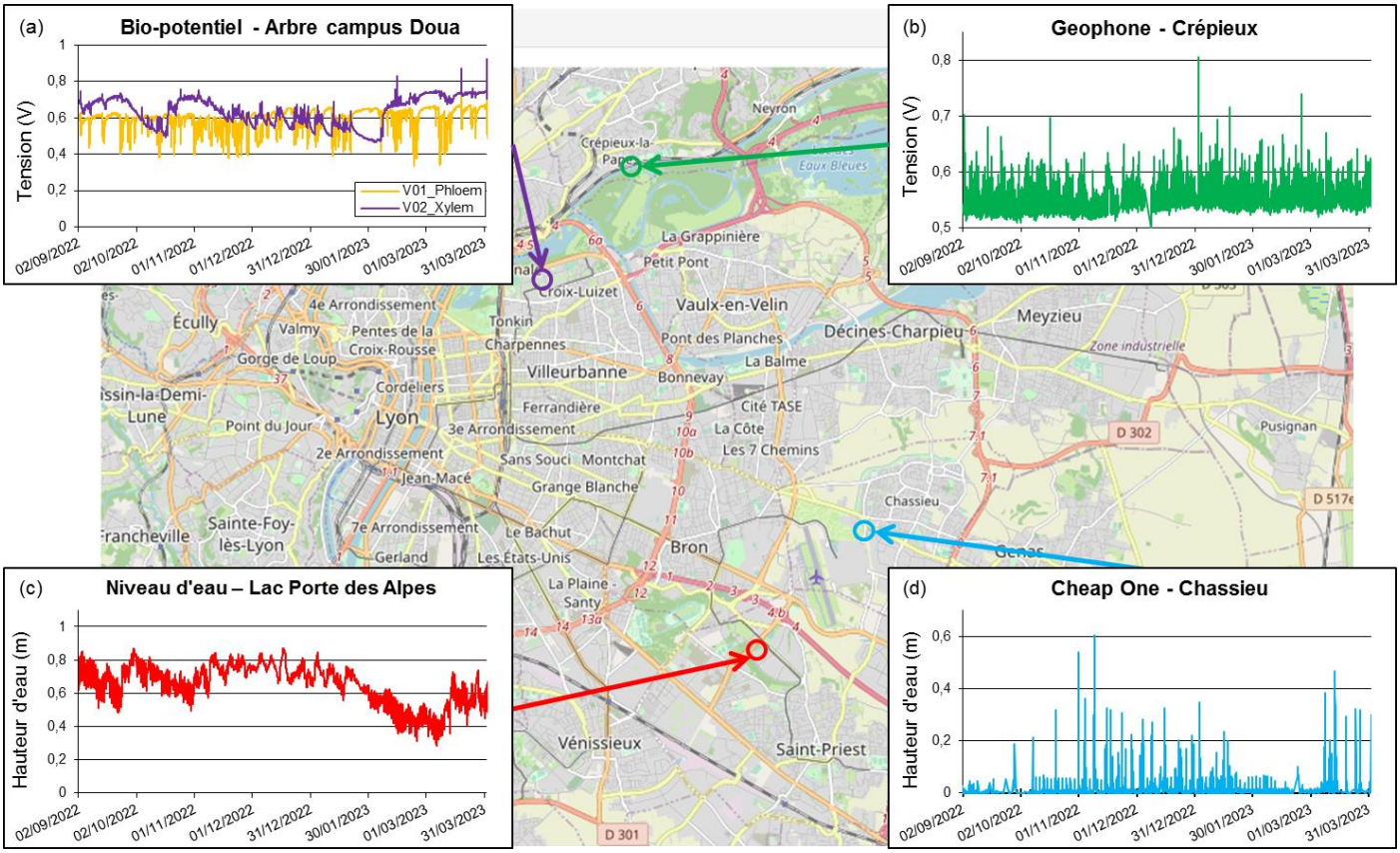


Figure 4 : *Localisation de quelques sites d'étude du projet Cheap'Eau sur Lyon et sa périphérie. (a) Suivi du biopotentiel au niveau du phloème et du xylème d'un arbre situé sur le campus de la Doua, (b) données enregistrées par le géophone installé au bord du Rhône à Crépieux dans le cadre de l'OSR (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.*

Pour suivre la hauteur d'eau d'un lac de gestion des eaux pluviales (Figure 4c), il a été décidé en fonction du contexte local de placer une sonde de pression 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 sites distributeurs), les valeurs mesurées sont comparées à celles d'une sonde de pression 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 » en Figure 4d a été conçu à partir d'un capteur ultrasonore JSN-SR04T. 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. L'explication du fonctionnement de l'appareil et l'évaluation de sa fiabilité par rapport à une sonde radar de référence sur le site de Chassieu de l'OTHU, fait l'objet d'un article dédié à destination de la revue HardwareX (cf. Fiche 11). Ce système est en fonctionnement autonome (sur panneau solaire) depuis plus de deux ans avec quelques mises à jour logiciel 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.

Cette tâche fait référence aux fiches techniques n°8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 et 17 :

8/ Des arbres pour surveiller les ouvrages de gestion des eaux pluviales (T2 + T4)

10/ Des méthodes d'encapsulage *low-cost* (robustes et discrets) pour nos systèmes de mesure sur le terrain (T4)

11/ OPENDATAEAU.org, une plateforme ouverte pour le recueil, la géo-visualisation et l'interprétation des données de terrain (T4 + T5)

12/ Système Niveaudo - validation du capteur JSN-SR04T sur le terrain (T4)

13/ Des piézomètres connectés pour suivre les ouvrages de gestion des Eaux Pluviales sur le site porte des Alpes (T4)

14/ Conception d'une sonde de turbidité robuste pour installer sur le terrain – Validation du capteur SEN0189 (T4)

15/ Projet TELESPHORE – suivi de Lysimètres *in situ* (T4)

16/ Installation de piézomètres à bas-coût pour suivre le fonctionnement hydraulique des nouvelles noues de Gerland (T4 + T5)

17/ Vers la formation d'etudiant.es : IUT, Master, écoles de printemps et d'été pour les doctorant.es (T4 + T5)

TACHE 5 : TRANSFERT DES RESULTATS ET VALORISATION OPERATIONNELLE

Objectif : Organiser la communication et le transfert des résultats de Cheap'Eau

DES OUTILS DE TRANSFERT VERS LA RECHERCHE ET LES OPERATIONELS

La tâche 5 vise à traduire concrètement les résultats de recherche en information exploitable pour le personnel opérationnel, pour essayer de transférer au maximum les résultats au sein de leurs pratiques. Plusieurs niveaux de valorisation et de transfert ont été proposés : i) **une page web de projet** : https://www.graie.org/othu/progr_cheapeau.html, ii) **une plateforme web de géo-visualisation des données**, Ode pour OpenDataEau : http://opendataeau.org/, iii) **différents évènements de restitution des recherches** auprès du personnel opérationnel, iv) des **fiches techniques, des conférences et des articles** à destination de la recherche et des acteurs techniques, v) des **modules de formation pour la recherche et les formations** continues dans le domaine de l'eau et vi) une **synthèse visuelle explicative des principes et des outils explorés**.

- Une page web : https://www.graie.org/othu/progr_cheapeau.htm. En 2019, une page internet vitrine au sein du site OTHU a été créée pour présenter et rendre compte des avancées du programme et diffuser les productions. Cette page web restera active après la fin du programme afin de poursuivre son rôle de boîte à outils et de mise en ligne de références sur le sujet.
- Le site Opendataeau : http://opendataeau.org/ (cf. Fiche 10). Il s'agit d'une plateforme commune rassemblant et donnant un accès libre en temps réel à des chroniques de mesures environnementales produites par différents laboratoires de recherche publics et leurs partenaires (INSA DEEP, CNRS-EVS, INRAE, ISA), notamment toutes les données Cheap'Eau.
  Opendataeau vise ainsi à communiquer et 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 scientifiques, les associations et le grand public.
- Différents évènements de restitution des recherches auprès des opérationnels :
  - Journée Autosurveillance Graie - Edition 2021 – Métrologie « non classique » | pistes à explorer pour alimenter le diagnostic permanent de son système- le 22 juin 2021 en Visio – 119 participants.
  - Café OTHU – 11 janvier 2021.
  - Séminaire CASPA capteurs et sciences participatives - 20/11/2020 - lien de la vidéo : https://www.youtube.com/watch?v=asx12uexvhy.
- De la formation initiale et de la sensibilisation des élèves de master, en ingénierie et en thèse doctorale : participation active au sein de l'école d'été H2O'Lyon – OTHU – RESEED : 4-6 juillet 2022 – animation d'un atelier le 6 juillet (cf. Fiche 14) ; une proposition de module de formation continue testée pendant 2 ans avec des promotions de master : en élaborant un programme pour former de futurs gestionnaires de l'eau.
- Un article de synthèse dans la revue TSM (Cherif *et al.*, à paraître).
- Des publication scientifiques et techniques (Gisi *et al.*, à paraître ; Cherif *et al.*, à paraître).
- Une synthèse visuelle explicative des principes et outils explorés (Livrable opérationnel final du programme).

A titre d'exemple, de valorisation et transfert, nous avons choisi de faire un éclairage sur la **Journée Graie « Autosurveillance des systèmes d'assainissement** – Métrologie « non classique » : pistes à explorer pour alimenter le diagnostic permanent de son système » (Edition 2021 (Fig. 5) ; le 22 juin 2021). Cette 16e édition était centrée sur la chaîne de mesure, les données et leurs utilisations au sein du diagnostic permanent. Elle a été l'occasion de restituer les travaux du groupe de travail du Graie sur l'autosurveillance, de faire un éclairage réglementaire, de présenter les stratégies et démarches retenues par différentes collectivités et de mobiliser des spécialistes, en métrologie et hydrologie urbaine dont les scientifiques Cheap'Eau.

Cette demi-journée centrée autour **des solutions *low-tech* non traditionnelles pour mieux connaitre le fonctionnement des systèmes d'assainissement**, et en particulier les rejets aux DO (déversoirs d'orage) a permis au groupe opérationnel (collectivités, bureaux d'études, entreprises privée) d'avoir des exemple de solutions « non traditionnelles » et complémentaires qui permettent d'acquérir plus d'informations à coûts moindres, de transformer de la donnée en une connaissance sur le fonctionnement du système et d'optimiser l'exploitation, le diagnostic permanent et la métrologie

réglementaire. Avec l'actualité réglementaire riche avec notamment la consultation pour la révision de la DERU proposant entre autre des évolutions du texte pour permettre de s'adapter plus facilement aux innovations et progrès scientifiques/technologiques, le programme Cheap'Eau et ces résultats à mi- parcours a permis de nombreux échanges et d'être prospectif sur ce changement de paradigme métrologique nécessaire dans les années à venir.

Cette journée, l'enquête menée dans la tache 1 et les échanges avec les opérationnels, nous ont conforté dans l'utilité de rédiger un article TSM en 2023 qui est dans la suite logique de ces premiers échanges.

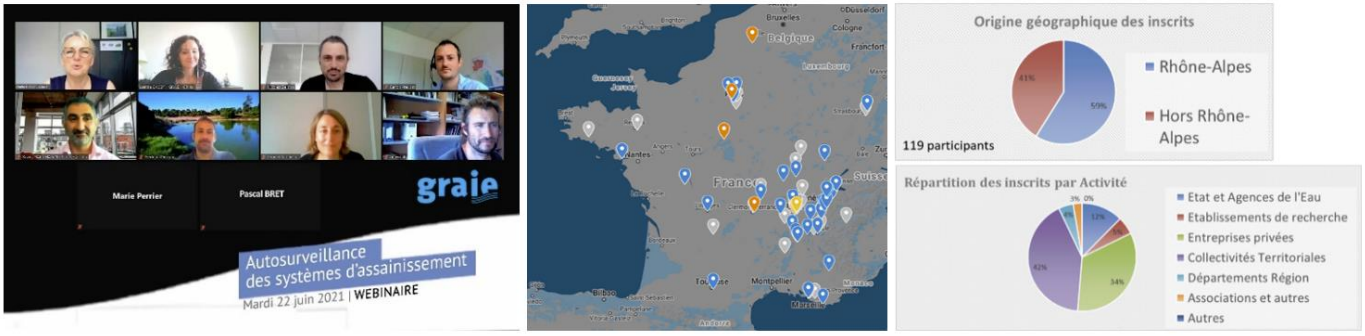


Figure 5 : *Synthèse du webinaire « Journée autosurveillance des réseaux d'assainissement | édition 2021 – métrologie « non classique » | pistes à explorer pour alimenter le diagnostic permanent de son système - 22 juin 2021 » en visioconférence. Participation : 119 participants – 52 organismes*

Cette tâche fait référence aux fiches techniques n°11, 16 17 et 18 :

11/ OPENDATAEAU.org, une plateforme ouverte pour le recueil, la géo-visualisation et l'interprétation des données de terrain (T4 + T5)

16/ Installation de piézomètres à bas-coût pour suivre le fonctionnement hydraulique des nouvelles noues de Gerland (T4 + T5)

17/ Vers la formation d'élèves : IUT, Master, écoles de printemps et d'été pour les doctorant.es (T4 + T5)

18/ Capteurs *low-cost* et sciences participatives : quelles perspectives pour la gestion des eaux pluviales ? (T5)

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

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 de matériels libres et ouverts aide l'ensemble des parties prenantes 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 du suivi (lieux pertinents) pour effectuer les mesurages.

REMERCIEMENTS

Les personnes responsables de ce rapport 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, Sara Coladonato, Adam Adewolu, Benoît Anquez, Fanny Bourgeau, Robin Mourelon, Omar Bajaj) et aux élèves ayant contribué au projet au cours de leur thèse doctorale (Qingchuan Zhu, Maria Gisi).

LISTE DES PUBLICATIONS (BIBLIOGRAPHIE CHEAP'EAU) :

PUBLICATIONS INTERNATIONALES

1. Cherqui F., James R., Poelsma P., Burns M.J., Szota C., Fletcher T. and 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), 437-456. https://doi.org/10.2166/h2oj.2020.050.

2. Cassel M., Navratil O., Perret F., and Piégay H. (2021), The e-RFIDuino: An Arduino-based RFID environmental station to monitor mobile tags, HardwareX, vol. 10, p. e00210 https://doi.org/10.1016/j.ohx.2021.e00210.

3. Cherif I., Gisi M., Perret F., Cherqui F. Bertrand-Krajewski J.-L., Walcker N., Bourjaillat B., Bacot L., Navratil O. (in review). *LevelWAN: a low-tech – low-cost, IoT, open-source and easy-to-use – water level system for rivers monitoring and other highly dynamic water applications*, HardwareX (à soumettre).

4. Hamel, P., Ding N., Cherqui F., Zhu Q., Walcker N., Bertrand-Krajewski J.-L., Champrasert P., Fletcher T., McCarthy D., Navratil O., Shi B. (2024). *Low-cost monitoring systems for urban water management: Lessons from the field*. Water Research X. 22. 100212. https://doi.org/10.1016/j.wroa.2024.100212.

5. Gisi *et al.*, (in review) *From dishwasher to the river: how to adapt a low-cost turbidimeter for low-tech water quality monitoring?*

PUBLICATIONS NATIONALES

6. Cherif I., Navratil O., Cherqui F., Namour Ph., Bertrand-Krajewski J.-L., Bacot L., Perret F., Walcker N., Fakri-Bouchet L., Bourjaillat B., Beguin P. (2024). *La métrologie bas-coûts, ouverte, sobre et connectée : un changement de paradigme pour l'observation des hydrosystèmes ?*, Techniques Sciences et Méthodes, 119 (3), 31-42.

7. Fakri-Bouchet L., Adewolu A., Anquez B., Perret F., Ranjel-Trejo A., Navratil O., Cherqui F., Namour Ph. (en cours de rédaction). Solutions innovantes à faible coût pour le suivi de la qualité de l'eau, Techniques Sciences et Méthodes.

CONFERENCES INTERNATIONALES

8. 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 Ph. (2022). *Low-cost* turbidimeter: from the washing machine to the research field, 7th IAHR Europe Congress, 7– 9/09/22, Athens (Greece).

9. Navratil O. (2022). Metrology for Water Systems, Webinair franco-australien H2O, 09/05/22, visoconférence.

10. Bourjaillat B., Perret F., Navratil O., Cherqui F., Namour Ph. (2021). Low cost sensor for hydrological & environmental monitoring using electro-physiological signals from trees, 10th Franco-Spanish Workshop CMC2-IBRNAM, 24-25/11/21, Arcachon (France).

11. Anquez B., Perret F., Navratil O., Cherqui F., Namour Ph. (2021). Cheap'Eau: Innovative *low-cost* and open source turbidity sensor for monitoring urban water systems, 10th Franco-Spanish Workshop CMC2-IBRNAM, 24-25/11/21, Arcachon (France).

12. Perret F., Krieg-Rabeski P., Maurer L., Namour Ph., Legout C., Freche G., Guyard H., Navratil O., Design and field-test of an operational *low-cost* and open-source system for river water quality monitoring Workshop "*Low-cost* Sensors and Microsystems for Environment Monitoring", 20-21/05/19, Toulouse (France). hal-03127722.

13. Cherqui F., Navratil O. (2022). *Low-cost* monitoring systems for water infrastructure.

14. Cherqui F., James R., Poelsma P., Szota C., Burns M.J., Fletcher T. and Bertrand-Krajewski J.-L. (2022). Real-time *low-cost* water level monitoring for nature-based stormwater solutions, 9th Leading-edge conf. on Strategic Asset management. IWA (Int. Water Assoc.), 11-13 May, Bordeaux, France.

15. Zhu Q., Cherqui F., Bertrand-Krajewski J.-L. (2023). *A low cost, autonomous, and connected rainfall monitoring station. SUD 2023 – 3rd International Symposium on Sustainable Urban Drainage*, Jiashan, Zhejiang, China, 19-22 Oct., 4 p.

CONFERENCES NATIONALES

16. Navratil O., Cherqui F., Namour Ph. (2022). RTCE Thème : Métrologie innovante, bas-coûts, libre et ouverte, à faible consommation énergétique, miniaturisation, …, 31/03/2022, visioconférence.

17. Navratil O., Cherqui F., Namour Ph. (2021). Cheap'Eau, Conception et évaluation terrain de systèmes bas-coûts & open-source pour le suivi des eaux urbaines, Conseil Scientifique OTHU, 08/12/21, Visioconf.

18. Namour Ph., Perret F., Bertrand-Krajewski J.-L., Cherqui F., Jose C., Fakri-Bouchet L., Jaffrezic N., Bacot L., Caltran H., Lacaille S., Montplot A., Beguin P., Lagarrigue C., Navratil O. (2020). Cheap'Eau, Innovative *low-cost* solutions for monitoring urban water management systems, Prospective INSU, Nouveau Capteurs environnementaux, 15-17/01/20, Banyuls/Mer (France).

19. Cherqui F., Perret F., Navratil O., Namour Ph. (2022). Vers un nouveau paradigme en métrologie environnementale : projet Cheap'Eau, colloque CMC2 "Analyse et Environnement : air, eaux, sols et co-produits", 30-31/05/22, Villeurbanne (France)

20. Zhu Q., Cherqui F., Bertrand-Krajewski J.-L. (2021). Station météorologique à bas-coût pour le suivi de toitures végétalisées. Actes des 9° Journées Doctorales en Hydrologie Urbaine "JDHU 2020", Strasbourg, France, 26-27 mai, 4 p. hal-03384905.

21. Zhu Q., Cherqui F., Bertrand-Krajewski J.-L. (2021). Capteurs météo à bas-coût pour la gestion des eaux pluviales par les toitures végétalisées. Journée Technique Axelera "La métrologie au service du pilotage des flux d'eau", Lyon, France, 14 Septembre. hal-03343770.

22. Cherqui F., Navratil O. (2021). Perspectives sur l'utilisation de capteurs connectés, autonomes et à bas-coût pour le diagnostic permanent| Premiers enseignements du Programme de recherche Cheap'Eau et Mind4stormwater. 16e journée d'échanges Graie- Autosurveillance des systèmes, Visio, France, 22 juin.

23. Navratil O. (2020). Présentation du programme de recherche Cheap'Eau dans le cadre du Séminaire CASPA Capteurs et Sciences Participatives - Vision- France, 20 novembre. https://youtu.be/ASX12UeXvHY

RAPPORTS INTERNES

24. Rapport d'avancement n°1 décembre 2019 – décembre 2020, rapport d'avancement 12 mois | CHEAP'EAU | Accord cadre OTHU AERMC 2019-2025 – volet assainissement.

25. Compte rendu réunion COPIL – 25 mars 2022.

THESES EN LIEN AVEC CHEAP'EAU

26. Zhu Q. (2023). *Low-cost sensors for monitoring stormwater source control measures*. Thèse de doctorat, INSA Lyon, Villeurbanne, France, 300 p.

27. Etienne N. (2024). *Transferts et processus associés aux résidus de médicaments humains et vétérinaires et aux biocides des boues urbaines et des lisiers utilisés comme fertilisants*. Thèse de doctorat, INSA Lyon, Villeurbanne, France, p.

28. *Gisi M.F.S. (en cours)*.

29. *Ribeiro Marques da Silva P.V. (en cours)*

RAPPORTS DE STAGE, PIRD, TITRE DES RAPPORTS DE MASTER 2

Les documents suivants sont des rapports d'étudiants et n'ont pas la même valeur scientifique que les documents revus par le consortium Cheap'Eau.

30. Adewolu A. (2020). Institut des Sciences Analytiques (ISA) – UMR 5280.

31. Adewolu A. (2021). Institut des Sciences Analytiques (ISA) – UMR 5280.

32. Anquez B. (2021). *Développement et validation de capteurs innovants, bas-coûts et open-sources pour le suivi de la turbidité des eaux pluviales en milieu urbain*. ENTPE, INRAE, Laboratoire EVS – UMR 5600.

33. Armand N., Volff S. (2022). Développement d'un système de mesure *low-cost* pour la mesure de hauteur d'eau. INSA Lyon – Laboratoire Deep.

34. Bourjaillat B. (2021). *Etude des signaux électrophysiologiques des arbres en fonction de leurs environnements et des événements hydrologiques*. INP Ense3, INRAE, Laboratoire EVS – UMR 5600.

35. Bourgeau F. (2023). *How to monitor the SuDS? Tracing the sentinel role of urban trees*. Laboratoire EVS – UMR 5600.

36. Mourelon R. (2023). Laboratoire EVS – UMR 5600.

37. Rapports étudiants master 2, 2022-2023 :
    i. Altazin E., Chembel F., Morillon C., Pinson P. (2022). *La métrologie low cost dans le cadre de la désimperméabilisation des sols à Lyon.*
    ii. Brosse N., Conesa T., Guérin A. (2022). *Comprendre si les ouvrages ont une réelle capacité d'infiltration des eaux de pluies.*
    iii. Dupont U., Lespine S., Michard Y. (2022). *Dans quelle mesure la méthodologie d'acquisition de ces données de températures et de niveaux piézométriques peut-elle être un outil pertinent dans le cadre du projet de ville perméable du Grand Lyon ?*
    iv. Faure L., Picon G., Varrambier H. (2022). *Suivi des dispositifs d'infiltration des eaux dans le quartier de Gerland. Contribution aux objectifs de désimperméabilisation de la métropole lyonnaise.*
    v. Mengarelli J., Gazeau-Lopez J., Arnou M. (2022). *Imperméabilité des sols à Lyon : Quelles solutions pour une ville plus perméable ?*

38. Rapports étudiants master 2 2023-2024 :
    i. Bessenay L., Desprats M., Lagrange I., Renou S., Sabatier J. (2024). *Boîte à outils : capteur de hauteur d'eau*
    ii. Boit E., Darmagnac I., Delaban M., Hugues M. (2024). *Mise en place d'une sonde de température sur les bords du Rhône*
    iii. Bras T., Devanne L., Morel M. (2024). *Informer sur la pollution des milieux aquatiques par temps de forte pluie : Mesure de l'arrivée des eaux polluées au sein des déversoirs d'orage.*

AUTRES SUPPORTS

39. Coladonato S., (2022). *Vidéo tutoriel Niveaudo*, disponible en français, anglais et italien : lien à ajouter

40. Fakri-Bouchet L., Adewolu A. (2022). *Low-cost* systems for water quality monitoring. Poster I.S. Rivers 4-8/07/2022, Lyon (France).

41. Gisi M.F.S. (2023). Poster NOVATECH 4-6/07/2023, Lyon (France).

REFERENCES EXTERNES

[1] Panda, K. G., Agrawal, D., Nshimiyimana, A. & Hossain, A. 2016 Effects of environment on accuracy of ultrasonic sensor operates in millimetre range. Perspectives in Science 8, 574–576. https://doi.org/10.1016/j.pisc.2016.06.024.

[2] 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 accounta bility: a Digital Earth view from East Africa. International Journal of Digital Earth, 4, 285-304.

[3] Gibert D., Le Mouël J.-L., Lambs L., Nicollin F., et Perrier F. (2006). Sap flow and daily electric potential variations in a tree trunk. *Plant Science*, 171(5), 572–584. doi : 10.1016/j.plantsci.2006.06.012.

[4] Panda, K. G., Agrawal, D., Nshimiyimana, A. & Hossain, A. 2016 Effects of environment on accuracy of ultrasonic sensor operates in millimetre range. Perspectives in Science 8, 574–576. https://doi.org/10.1016/j.pisc.2016.06.024

[5] Allen, Deonie, Valerie Olive, Scott Arthur, et Heather Haynes. (2015). « Urban Sediment Transport through an Established Vegetated Swale: Long Term Treatment Efficiencies and Deposition ». Water 7 (3): 1046 67. https://doi.org/10.3390/w7031046.

[6] *Circuit pédagogique autour de l'eau au parc technologique Porte des Alpes*, p50 « Le circuit de l'eau à la porte des alpes », Grand Lyon. https://www.grandlyon.com/fileadmin/user_upload/media/pdf/eau/20210316_circuit-pedagogique-parc-technologique.pdf (consulté en novembre 2023)

[7] Hanan, Gunawan, A.A.N., Sumadiyasa, M. (2019). *Water Level Detection System Based on Ultrasonic Sensors HC-SR04 and ESP8266-12 Modules with Telegram and Buzzer Communication Media*. Instrumentation Mesure Métrologie, 18(3): 305-309. https://doi.org/10.18280/i2m.180311.

PERSONNES CONTRIBUTEURICES A LA REDACTION DU RAPPORT

Cheap'Eau :

- Ingénieurs d'études du Projet : Lionel LORD, Julien CASTRO, Bastien BOURJAILLAT, Ilane CHERIF
- Doctorants : Maria GISI, Qingchuan ZHU, Noémie ETIENNE, Paulo RIBEIRO
- Stagiaires : Fanny BOURGEAU, Robin MOURELON
- EVS, Univ. Lyon 2 : Oldrich NAVRATIL, Franck PERRET
- INSA Lyon, DEEP : Jean-Luc BERTRAND-KRAJEWSKI, Frédéric CHERQUI, Nicolas WALCKER
- INRAE (ex Irstea-Lyon), RiverLy : Philippe NAMOUR
- UMR 5280 ISA : Latifa BOUCHET
- Graie-OTHU : Laëtitia BACOT
- ÆGIR : Priscille BEGUIN

Partenaires :

- AERMC : Camille ARNAULT
- Lyon Métropole : Hervé CALTRAN

Ce programme de recherche a été animé par Oldrich NAVRATIL EVS - Université Lyon 2 (Oldrich.Navratil@univ-lyon2.fr) avec l'appui de Laëtitia Bacot du Graie (laetitia.bacot@graie.org)

ANNEXES : Liens sur les fiches techniques du programme

- Fiche_Technique_1_-_ETAT_DE_L'ART_DES_CAPTEURS_A_FAIBLE_COUT_EN_HYDROLOGIE_URBAINE.pdf
- Fiche_Technique_2_-_TESTS_ET_EVALUATION_DE_CAPTEURS_METEOROLOGIQUES_A_BAS-COUT.pdf
- Fiche_Technique_3_-_STANDARDISER_LE_TEST_ET_LA_SELECTION_DE_CAPTEURS_DE_NIVEAU_D'EAU_LOW-COST.pdf
- Fiche_Technique_4_-_UN_CAPTEUR_DE_TURBIDITE_DE_LAVE-VAISSELLE_POUR_MESURER_LA_TURBIDITE_TESTS_EN_LABORATOIRE.pdf
- Fiche_Technique_5_-_TESTS_EN_LABORATOIRE_DE_CAPTEURS_MICRO-ONDES_LOW-COST_POUR_MESURER_LA_QUALITE_DE_L'EAU.pdf
- Fiche_Technique_6_-_UNE_CENTRALE_D'ACQUISITION_ENVIRONNEMENTALE_LOW-COST_OPEN-SOURCE_ROBUSTE_ET_CONNECTEE.pdf
- Fiche_Technique_7_-_COMMUNICATION_DES_DONNEES_EN_LIGNE.pdf
- Fiche_Technique_8_-_DES_ARBRES_POUR_SURVEILLER_LES_OUVRAGES_DE_GESTION_DES_EAUX_PLUVIALES.pdf
- Fiche_Technique_9_-_VALIDATION_DES_PLUVIOGRAPHES_A_BAS-COUT.pdf
- Fiche_Technique_10_-_DES_METHODES_D'ENCAPSULAGE_LOW-COST_(ROBUSTE_ET_DISCRET)_POUR_NOS_SYSTEMES_DE_MESURE_SUR_LE_TERRAIN.pdf
- Fiche_Technique_11_-_OPENDATAEAU_UNE_PLATEFORME_OUVERTE_POUR_LE_RECUEIL_LA_GEO-VISUALISATION_ET_L'INTERPRETATION_DES_DONNEES_DE_TERRAIN.pdf
- Fiche_Technique_12_-_SYSTEME_NIVEAUDO_-_VALIDATION_DU_CAPTEUR_JSN-SR04T_SUR_LE_TERRAIN.pdf
- Fiche_Technique_13_-_DES_PIEZOMETRES_CONNECTES_POUR_SUIVRE_LES_OUVRAGES_DE_GESTION_DES_EAUX_PLUVIALES_SUR_LE_SITE_PORTE_DES_ALPES.pdf
- Fiche_Technique_14_-_CONCEPTION_D'UNE_SONDE_DE_TURBIDITE_ROBUSTE_POUR_LE_TERRAIN_–_VALIDATION_DU_CAPTEUR_SEN0189.pdf
- Fiche_Technique_15_-_PROJET_TELESPHORE_–_SUIVI_DE_LYSIMETRES_IN_SITU.pdf
- Fiche_Technique_16_-_INSTALLATION_PAR DES_ETUDIANTS_DE_PIEZOMETRES_A_BAS-COUT_POUR_SUIVRE_LE_FONCTIONNEMENT_HYDRAULIQUE_DES_NOUVELLES_NOUES_DE_GERLAND.pdf
- Fiche_Technique_17_-_VERS_LA_FORMATION_D'ETUDIANTS_IUT_MASTER_ECOLES_DE_PRINTEMPS_ET_D'ETE_POUR_LES_DOCTORANTS.pdf
- Fiche_Technique_18_-_CAPTEURS_LOW-COST_ET_SCIENCES_PARTICIPATIVES_QUELLES_PERSPECTIVES_POUR_LA_GESTION_DES_EAUX_PLUVIALES.pdf

CHERCHEUR·SES
observation sociale
données fiables
coût raisonnable
données pertinentes
récupération des capteurs
exploration fine des hydrosystèmes
validation des données
moyens humains
accompagnement des métiers
TECHNICIEN·NES
choix des paramètres et des lieux pertinents
validation
données fiables en temps réel
transférable
système d'alerte + précis
maintenance pro-active
GESTIONNAIRES
observation à différentes échelles
t1
t2
t3
études à long terme
CHEAP'EAU
LES PERSPECTIVES
une MÉTROLOGIE FRUGALE
au SERVICE d'une MÉTROLOGIE d'AVENIR
accès aux données
acceptabilité de la fiabilité
système d'alerte + précis
outils low-cost
MAIS
coûts humains
et
aide à la décision
gestion efficace
DÉCIDEUR·ES
écoles
innovation
pédagogie à l'environnement
sciences participatives
ASSOCIATIONS, HABITANT·ES, FABLAB
dessiné par le trait de lou
Qthu
agence de l'eau