



**HAL**  
open science

# Développement et validation de capteurs innovants, bas-coûts et open-sources pour le suivi de la turbidité des eaux pluviales en milieu urbain

Benoît Anquez

► **To cite this version:**

Benoît Anquez. Développement et validation de capteurs innovants, bas-coûts et open-sources pour le suivi de la turbidité des eaux pluviales en milieu urbain. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2021. dumas-03597242

**HAL Id: dumas-03597242**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03597242>**

Submitted on 4 Mar 2022

**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.

Copyright



# Travail de fin d'études

pour le diplôme d'ingénieur de l'École nationale des travaux publics de l'État

---

Année 2020-2021

Voie d'approfondissement :  
CELVN

Soutenu le 3 septembre 2021

Devant le jury composé de :

- Président du Jury : Mme. Claude Durrieu
- Maître de TFE : M. Oldrich Navratil
- Expert : M. Frédéric Cherqui

Par

**Benoît Anquez**

**Développement et validation de capteurs innovants,  
bas-coûts et open-sources pour le suivi de la turbidité des  
eaux pluviales en milieu urbain**

**Organisme d'accueil  
INRAE – Laboratoire EVS-UMR 5600**





# Notice analytique

AUTEUR			
Nom	Anquez		
Prénom	Benoît		
ORGANISME D'ACCUEIL			
Nom de l'organisme et Localité	INRAE, 5 rue de la Doua - CS 20244 - 69625 Villeurbanne Cedex Sur le site du laboratoire UMR 5600 EVS-IRG, Université Lumière Lyon 2 / Campus Porte des Alpes, Bâtiment Europe, 5 avenue Pierre Mendès-France, 69676 Bron cedex		
Nom du Tuteur	Oldrich Navratil – Philippe Namour		
ANALYSE DU TFE			
Titre (français)	Développement et validation de capteurs innovants, bas-coûts et open-sources pour le suivi de la turbidité des eaux pluviales en milieu urbain		
Titre (anglais)	Development and validation of innovative, low-cost, and open-source sensors for monitoring stormwater turbidity in urban environments		
Résumé (français)	<p>Mesurer la turbidité est essentiel dans le contrôle de la qualité des eaux en milieu urbain. Cependant, le matériel disponible dans le commerce est très onéreux, ce qui limite les possibilités en termes de déploiement de matériel. Le développement de sondes fiables pour un coût réduit et fabriquées à partir de matériel open-source est une alternative à ces sondes commerciales. Après une analyse de différentes sondes bas-coûts déjà développées, un modèle de sonde est fabriqué puis testé en milieu urbain dans un bassin de rétention d'eaux pluviales situé à Chassieu dans l'est lyonnais. Les premiers résultats montrent le potentiel de la sonde de turbidité développée bien que des améliorations puissent encore être apportées, notamment en ce qui concerne le fouding.</p>		
Résumé (anglais)	<p>Measuring turbidity is essential for monitoring water quality in urban areas. However, commercially available equipment is very expensive, which limits the possibilities in terms of equipment deployment. The development of reliable, low-cost sensors made from open-source material is an alternative to these commercial sensors. After an analysis of different low-cost probes already developed, a probe model was built and tested in an urban environment in a rainwater retention basin located in Chassieu in eastern Lyon. The first results show the potential of the turbidity probe developed, although improvements can still be made, particularly regarding fouling.</p>		
Mots-clés (français, 5 maxi)	Turbidité, Capteur, Surveillance, MES (Matières en suspension), qualité		
Mots-clés (anglais, 5 maxi)	Turbidity, Sensor, Monitoring, Suspended solids, quality		
Termes géo-graphique (français)	Bassin de rétention et d'infiltration dans l'est lyonnais (Chassieu, 69680)		
COLLATION			
	Nb de pages	Nb d'annexes (nb de pages)	Nb de réf. biblio.
	66	1 (5)	23

# Déclaration de travail personnel

---

Je déclare que ce rapport constitue l'aboutissement d'un travail personnel et ne peut être suspecté de plagiat.

Le travail présenté distingue explicitement ce que j'ai produit de ce que j'ai emprunté à d'autres. A ce titre, les citations sont clairement identifiables et les sources (écrits, images) qui ont alimenté ma réflexion sont référencées.

# Remerciements

---

Je tiens tout d'abord à remercier Philippe Namour et Oldrich Navratil pour leur encadrement tout au long de ce stage, leur disponibilité ainsi que leurs propositions judicieuses.

Je remercie également Franck Perret, assistant ingénieur du laboratoire pour son aide précieuse et ses conseils sur la réalisation des montages électriques.

J'exprime également ma gratitude envers l'ensemble du personnel du laboratoire IRG-EVS pour son accueil et sa disponibilité en cas de besoin. Mes remerciements vont aussi aux autres stagiaires et doctorants présents au laboratoire pour les bons moments passés ensemble.

Enfin, je remercie l'ensemble des membres de Cheap'Eau pour leur écoute et l'intérêt porté à mon travail et en particulier Frédéric Cherqui qui a accepté de participer au jury de soutenance en qualité d'expert.

# Table des matières

---

Notice analytique.....	3
Déclaration de travail personnel.....	4
Remerciements.....	5
Table des matières.....	6
Liste des illustrations.....	8
Liste des tableaux.....	10
Liste des abréviations.....	10
1. Introduction.....	11
2. Etat de l'art.....	13
2.1 Sélection et comparaison des articles traitant de la turbidité bas-coûts.....	13
2.2 Principe de mesure de la turbidité.....	15
2.3 Unités, normes et plage de mesure de la turbidité.....	17
2.4 Encapsulage des sondes.....	18
2.5 Milieu d'étude, prix et limites.....	19
2.6 Comparaison des sondes professionnelles.....	20
3. Matériel et méthode.....	23
3.1 Principe de fonctionnement de la sonde.....	23
3.2 Présentation de la sonde de turbidité.....	25
3.2.1 Sonde de turbidité.....	25
3.2.2 Boîtier d'acquisition et alimentation.....	30
3.2.3 Estimation du prix de la sonde.....	34
3.3 Tests en laboratoire.....	35
3.3.1 Test des modifications apportées à la tête de la sonde.....	35
3.3.2 Test du boîtier d'acquisition et fonctionnement dans le temps.....	37
3.4 Zone d'étude.....	38
3.4.1 Présentation du site Django Reinhardt de Chassieu.....	38
3.4.2 Installation dans le bungalow du bassin d'infiltration.....	39
3.4.3 Installation sur la canne de mesure de la hauteur d'eau dans la canalisation du bassin de rétention.....	41
3.4.4 Première installation sur la paroi de la canalisation d'arrivée du bassin de rétention	42
3.4.5 Seconde installation sur la paroi la canalisation d'arrivée du bassin de rétention	43
4. Résultats et discussion.....	45

4.1	Résultats en laboratoire .....	45
4.1.1	Modification des LED et de l'alimentation du capteur de turbidité.....	45
4.1.2	Test du capteur sur plusieurs jours .....	50
4.2	Résultats du site d'étude de Chassieu.....	51
4.2.1	Résultats du bungalow d'infiltration .....	51
4.2.2	Résultats de l'installation sur le flotteur .....	53
4.2.3	Résultats de la première installation sur la paroi de la canalisation.....	53
4.2.4	Résultats de la seconde installation sur la paroi de la canalisation .....	55
4.2.5	Compensation du fouling .....	57
5.	Conclusions générales et perspectives.....	59
	Bibliographie.....	60
	Sitographie .....	61
	Annexes.....	62



# Liste des illustrations

---

Figure 1 : Principe de mesurage par néphélogétrie (ONEMA, avril 2015).....	16
Figure 2 : Principe de mesurage par atténuation (ONEMA, avril 2015).....	16
Figure 3 : Sonde de turbidité open-source proposée par C. D. Kelley et al., 2014.....	19
Figure 4 : Sonde de turbidité mesurant en continu dans une canalisation (Theofanis P. Lambrou et al., 2013).....	19
Figure 5 : Sonde de turbidité entourant la canalisation (David Gillett et al., 2019).....	19
Figure 6 : Diagramme fonctionnel du programme Arduino.....	24
Figure 7 : Capteur de turbidité SKU SEN0189.....	25
Figure 8 : Circuit imprimé d'origine (vue du dessus).....	26
Figure 9 : Circuit d'origine imprimé (vue du dessous).....	26
Figure 10 : LED émettrice QEE113 (blanche) et réceptrice TEKT5400S (noire).....	26
Figure 11 : Circuit imprimé modifié (vue du dessus).....	27
Figure 12 : Circuit imprimé modifié (vue du dessous).....	27
Figure 13 : Capteur de température DS18B20.....	28
Figure 14 : Tête de la sonde (vue du dessus).....	29
Figure 15 : Tête de la sonde (vue du dessous).....	29
Figure 16 : Arrière de la sonde.....	29
Figure 17 : Corps de la sonde.....	29
Figure 18 : Panneau solaire alimentant la sonde.....	30
Figure 19 : Boîtier d'acquisition ouvert.....	30
Figure 20 : Carte Arduino MKR Wan 1310 avec son antenne.....	31
Figure 21: MKR Mem Shield pour Arduino MKR.....	31
Figure 22 : Montage électrique du boîtier d'acquisition.....	32
Figure 23 : Schéma électrique de la sonde.....	33
Figure 24 : Sonde WTW VisoTurb.....	36
Figure 25 : Sonde Endress-Hauser.....	36
Figure 26 : Chariot de test des sondes de turbidité.....	37
Figure 27 : Bassin de rétention du site Django Reinhardt (1er juin 2021).....	38
Figure 28 : Bassin d'infiltration du site Django Reinhardt (1er juin 2021).....	38
Figure 29 : Schéma de situation du site Django Reinhardt (GRAIE, Présentation des sites).....	39
Figure 30 : Situation géographique du site (Google Earth).....	39
Figure 31 : Bungalow de mesure OTHU du bassin de rétention (1er juin 2021).....	40

Figure 32 : Canal de dérivation d'une station OTHU (1er juillet 2021).....	40
Figure 33 : Boîtier d'enregistrement installé dans le bungalow (1er juillet 2021).....	41
Figure 34 : Sonde de turbidité installée dans le canal (1er juillet 2021).....	41
Figure 35 : Installation de la sonde sur la canne de mesure de la hauteur d'eau.....	42
Figure 36 : Installation de la sonde de turbidité dans un renforcement de la canalisation (16 juillet 2021).....	43
Figure 37 : Installation de la sonde dans l'écoulement (26 juillet 2021).....	44
Figure 38 : Tension de sortie des différentes sondes de turbidité à l'ombre et au soleil - R = 1 k $\Omega$ .....	46
Figure 39 : Tension de sortie des différentes sondes de turbidité à l'ombre et au soleil - R = 500 $\Omega$ .....	47
Figure 40 : Tension de sortie des différentes sondes de turbidité- - R = 1 k $\Omega$ - Eau chargée à 10 g/l.....	48
Figure 41 : Evolution des écarts relatifs des quatre sondes dans le temps - Eau chargée à 10 g/l.....	48
Figure 42 : Tension de sortie de la sonde de turbidité pour différentes valeurs de résistance en eau claire et à 0,75 g/l.....	49
Figure 43 : Evolution de la tension de sortie au cours du temps pour une solution chargée à 10 g/l.....	50
Figure 44 : Evolution de la tension de la batterie au cours du temps.....	51
Figure 45 : Evolution de la turbidité mesurée dans le bungalow d'infiltration.....	52
Figure 46 : Encrassement de la sonde après dix jours de fonctionnement.....	52
Figure 47 : Evolution de la turbidité mesurée par l'installation sur la canne de mesure de hauteur d'eau.....	53
Figure 48 : Evolution de la turbidité mesurée par la première installation sur la paroi de la canalisation.....	54
Figure 49 : Zoom sur l'événement pluvieux du 16 juillet 2021.....	55
Figure 50 : Evolution de la turbidité mesurée par la seconde installation sur la paroi de la canalisation.....	56
Figure 51 : Evolution de la température au cours du temps pour la seconde installation sur la paroi de la canalisation.....	56
Figure 52 : Zoom sur l'événement pluvieux du 28 juillet 2021.....	57
Figure 53 : Linéarisation de la diminution de la tension due au fouling.....	58

# Liste des tableaux

---

Tableau 1 : Tableau comparatif de différentes sondes de turbidité bas-coûts proposées dans la littérature scientifique.....	15
Tableau 2 : Normes encadrant la mesure de la turbidité (d'après J. Trevathan et al., 2020).....	18
Tableau 3 : Tableau comparatif de différentes sondes de turbidité professionnelles disponibles dans le commerce.....	22
Tableau 4 : Prix des différents constituants de la sonde.....	35

# Liste des abréviations

---

FAU : Formazine Attenuation Unit

FNU : Formazine néphélobimétric unit

FTU : Formazin Turbidity Unit

Graie : Groupe de recherche, animation technique et information sur l'eau

IR : Infrarouge

LoRaWAN : Long Range Wide-area network

MES : Matières En Suspension

NTU : Nephelometric Turbidity Units

ONEMA : Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques

OTHU : Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine

TTN : The Things Network

# 1. Introduction

Les exigences vis-à-vis de la préservation de la ressource en eau et de sa qualité sont en constante augmentation, notamment en ce qui concerne la qualité des eaux des réseaux d'assainissement. Ainsi, la directive européenne du 21 mai 1991, transposée dans le droit français, impose la mise en œuvre de dispositifs d'autosurveillance des systèmes d'assainissement. De même, la directive cadre sur l'eau (DCE-2000) renforce les besoins d'optimisation des systèmes d'assainissement (ONEMA, 2015). Pour assurer la surveillance des systèmes d'assainissement, de nombreux paramètres physico-chimiques sont étudiés parmi lesquels la turbidité.

La turbidité définit la teneur en MES (Matières En Suspension) qui troublent un fluide. Ces matières sont principalement de deux types : d'origine minérale avec des sédiments en suspension et d'origine végétale avec des algues et des bactéries (Parra et al., 2018). La turbidité est essentiellement mesurée à partir de deux méthodes optiques, faisant intervenir un ou plusieurs faisceaux lumineux traversant l'eau dont la turbidité est à mesurer. Ces deux techniques sont l'atténuation et la néphélogéométrie (ONEMA, 2015).

Tout comme pour la mesure d'autres paramètres comme la conductivité ou le pH, la mesure de la turbidité nécessite des analyses de prélèvements en laboratoire, coûteux en temps et en matériel ou des mesures en continu sur le terrain. De nombreuses sondes de turbidité assurant ces mesures sont en vente dans le commerce mais leurs prix, pouvant facilement atteindre plusieurs milliers d'euros selon les modèles (Annexe 2), sont un frein à la mise en place d'études sur le long terme et sur de grandes échelles spatiales. Plusieurs projets d'étude ont été mis en place ces dernières années avec pour objectif de produire des sondes fiables à bas-coûts (Annexe 1).

Pour cela, ces projets se fondent principalement sur l'utilisation de technologies open-source, c'est-à-dire des technologies permettant le libre accès au code source, la création et la redistribution de produits dérivés. Ces dernières années, les technologies open-source se sont particulièrement développées et démocratisées, facilitant grandement leur accès à un public très large. Ainsi, l'accès à des composants électroniques variés, de qualité et à bas-coûts comme les microcontrôleurs Arduino®, à l'impression 3D et autres machines-outils a contribué au partage et à la création de nombreux projets dans des domaines très variés. Loin d'être réservées aux particuliers, ces technologies sont aussi sollicitées par de nombreux organismes, comme les laboratoires, permettant à ces derniers de réaliser d'importantes économies comparativement au matériel propriétaire équivalent (Joshua M. Pearce, 2020).

Le développement de la sonde de turbidité présentée dans ce rapport s'inscrit dans le cadre du projet Cheap'Eau. Ce projet de recherche, financé dans le contexte d'un accord-cadre entre l'Agence de L'eau Rhône Méditerranée Corse et l'OTHU (Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine, Fédération de recherche) sur la période 2019-2022, vise à concevoir des systèmes innovants et économes, basés sur des capteurs bas-coûts, pour la gestion de la qualité et de la quantité des eaux pluviales dans les réseaux d'assainissement (site du Graie). Il est mis en place par différents acteurs, parmi lesquels les équipes de recherche EVS Lyon2, INSA Deep, INRAE et ISA, la Métropole de Lyon, la start-up AEGIR ou encore l'association Graie et a pour objectif d'évaluer l'intérêt et les bénéfices de technologies bas-coûts et open-sources dans la gestion des eaux pluviales par expérimentation de ces systèmes. Cette évaluation doit conduire à une meilleure visibilité des possibilités en termes d'utilisation de ces technologies dans la gestion des eaux pluviales. Enfin, Cheap'eau se donne également pour objectif de guider les utilisateurs sur la manière de tirer profit de ces technologies en fonction de leurs objectifs.

La sonde de turbidité développée ici fonctionne à partir d'un microcontrôleur Arduino® et divers autres composants bas-coûts gérant l'alimentation, l'horodatage et l'enregistrement des données. À la suite de la réalisation du premier prototype, des essais en laboratoire sont effectués pour confirmer son bon fonctionnement. Cette phase de test est suivie par une phase d'acquisition sur le terrain, sur le site du bassin de rétention Django Reinhardt de Chassieu (69) déjà équipé d'une instrumentation traditionnelle par l'OTHU disposée dans des bungalows. Cette phase, visant à éprouver la sonde et à comparer les résultats avec des sondes traditionnelles coûteuses, a mis en exergue des difficultés liées à la métrologie sur le terrain et à l'acquisition sur le long terme.

Cette expérimentation vise à établir si le développement de capteurs bas-coûts mesurant la turbidité permet d'obtenir des données satisfaisantes et en quoi cela pourrait faciliter le suivi de la qualité des eaux pluviales urbaines.

## 2. Etat de l'art

### 2.1 Sélection et comparaison des articles traitant de la turbidité bas-coûts

Pour établir un état de l'art de la turbidité à bas-coût, plusieurs articles ont été recherchés à l'aide de Google Scholar avec les mots-clefs suivants : « Turbidity sensor », « Suspended sediment », « Low-cost », « Affordable sensor », « Formazine, Calibration », « Nephelometer » et « Water quality monitoring ». Ces différents mots-clefs n'ont pas forcément été utilisés tous ensembles, mais par groupes de 2 ou 3.

De cette recherche, une douzaine d'articles ont été sélectionnés. Leurs dates de publication montrent que les premiers turbidimètres à bas-coût ont été développés dès les années 90 mais c'est surtout dans les années 2010 et particulièrement depuis 2015 que le nombre de publications augmente. Cette évolution de l'intérêt pour le développement de sondes à prix réduits peut s'expliquer par la nécessité croissante de mesurer la qualité des eaux mais aussi par la facilité grandissante d'accès à des technologies fiables et peu chères.

Les différentes caractéristiques propres à chacune des sondes retenues pour cet état de l'art sont présentées et comparées dans le tableau 1.

Sources	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]
<b>Type de capteur</b>												
Néphélométrie (90°)			X		X	X	X	X	X	X	X	X
Atténuation (180°)	X	X		X	X	X	X	X	X			
Autres angles												
LED colorée	X			X								
LED IR	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X
Caméra IR								X				
Fibres optiques							X			X		
Lentilles GRIN										X		
<b>Conception</b>												
Encapsulage	X	X	X	X	X	X		X	X		X	X
Prise en compte du fouling									X		X	X
Prise en compte de la température du milieu		X							X			
<b>Mesure</b>												
Echantillon						X	X	X		X		X
Mesure en continu	X	X	X	X	X		X		X		X	
<b>Calibration</b>												
Formazine		X				X					X	

Autre gamme de concentration connue	X			X	X			X	X			X
Calage avec une sonde professionnelle			X		X				X	X		X
Non indiqué							X					
<b>Plages de mesure</b>												
0 - 10 NTU			X		X	X		X	X	X	X	X
10 – 100 NTU	X		X		X	X		X	X	X	X	X
100 – 200 NTU	X	X	X		X	X		X		X	X	X
200 – 1000 NTU		X	X		X			X		X	X	X
1000 – 4000 NTU		X										
Mesures en volts non converties				X								
Non indiqué							X					
<b>Milieu d'étude</b>												
Laboratoire / Echantillons			X		X		X	X		X		X
Milieu marin											X	
Milieu aquatique		X										
Aquaculture	X											
Canalisation / Eau potable			X		X				X			
Extraction Traditional Chinese Medicine (TCM)						X						
Fonte des glaces en Islande				X								
<b>Prix</b>												
0 - 25 € (Non complet)	X	X										
25 – 50 €												X
50 – 75 €			X	X								
Non indiqué					X	X	X	X	X	X	X	
<b>Alimentation</b>												
Batterie			X	X	X						X	X
Secteur								X				
Panneau solaire		X									X	
Non indiquée	X					X	X		X	X		
<b>Consommation</b>												
Non indiquée	X	X	X		X	X	X			X	X	X
26 mA				X				X				
50 mA									X			
<b>Durée de vie</b>												
Non estimée	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Système de communication à distance												
Inclus		X			X				X		X	
Non inclus	X		X	X		X	X	X		X		X
Lumière ambiante												
Gérée par l'encapsulation	X	X		X	X	X			X			
Gérée par mesure avec l'émetteur éteint											X	X
A améliorer			X									
Non prise en compte / indiquée							X	X		X		
Coût environnemental												
Non évalué / indiqué	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

**Tableau 1 : Tableau comparatif de différentes sondes de turbidité bas-coûts proposées dans la littérature scientifique**

### Sources du tableau comparatif :

- [1] Lorena Parra et al., février 2018
- [2] Jarrod Trevathan et al., 2020
- [3] David Gillett et al., 2019
- [4] Damian M. Lawler et al., 1992
- [5] Youchao Wang, et al., 2018
- [6] Zhenzhong Zang et al., 2020
- [7] Filipa Sequeira et al., 2019
- [8] Yuanyang Zhu et al., 2020
- [9] Theofanis P. Lambrou et al., 2013
- [10] Michael Metzger et al., 2018
- [11] Óscar Sampedro et al., 2015
- [12] Christopher D. Kelley et al., 2014

## 2.2 Principe de mesure de la turbidité

De nombreux projets de sondes de turbidités ont fait l'objet de publications dans la littérature scientifique. La quasi-totalité d'entre elles fonctionnent sur le principe d'une mesure optique comme pour les sondes professionnelles. Deux méthodes sont principalement employées pour déterminer la turbidité d'un fluide : la mesure par atténuation et la mesure par néphélométrie. La différence entre ces deux méthodes réside dans l'angle formé entre la source émettrice et le récepteur.



La méthode de mesure par néphélogétrie consiste en l'utilisation d'un récepteur positionné à  $90^\circ$  par rapport à la source émettrice comme schématisé par la figure 1. Plus la turbidité du milieu est élevée, plus la diffusion de la lumière par les particules en suspension sera importante et plus le récepteur percevra donc de lumière. Le signal émis par le récepteur est donc d'autant plus fort que la turbidité est importante.

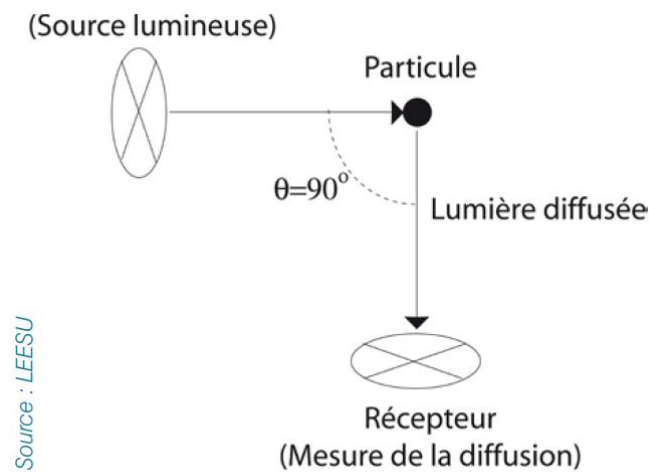


Figure 1 : Principe de mesure par néphélogétrie (ONEMA, 2015)

En ce qui concerne la mesure par atténuation, une source lumineuse émettrice est placée en face d'un récepteur. La solution dont la turbidité doit être déterminée se situe entre l'émetteur et le récepteur comme montré à la figure 2. Plus la turbidité est importante et plus la lumière sera absorbée et diffusée et donc plus l'intensité lumineuse perçue par le récepteur sera faible. Le signal émis par le récepteur est d'autant plus faible que la turbidité est élevée.

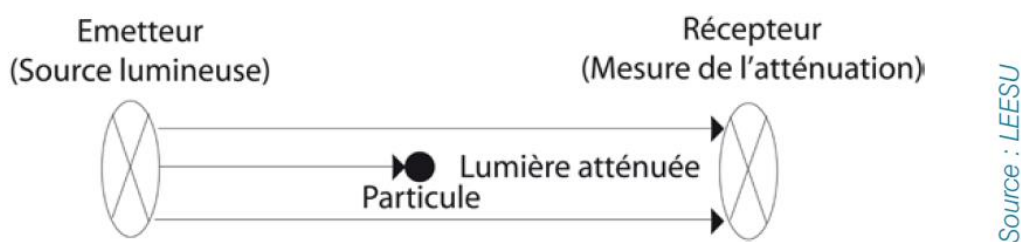


Figure 2 : Principe de mesure par atténuation (ONEMA, avril 2015)

La méthode de mesure par néphélogétrie s'utilise en assainissement pour des turbidités moins importantes que la mesure par atténuation. Ainsi, une mesure par atténuation peut s'effectuer sur des plages de 0 à 2000 FAU (Formazine Attenuation Unit) tandis que celle par néphélogétrie s'utilise sur des plages de 0 à 1000 FAU. D'autres angles de mesure peuvent être utilisés. C'est particulièrement le cas pour les sondes professionnelles qui effectuent souvent leur mesure sous quatre angles différents.

Pour effectuer ces mesures, des LED fonctionnant avec des longueurs d'onde dans le proche infrarouge sont privilégiées. En effet, le proche infrarouge permet de faire abstraction de la couleur des sédiments ou des organismes en suspension. D'autres solutions utilisant des caméras (Yuanyang Zhu et al., 2020) ou des fibres optiques (Filipa Sequeira et al., 2019 ; Michael

Metzger et al., 2018) ont aussi été étudiées avec des résultats satisfaisants. Les mesures de la turbidité par néphélométrie et atténuation restent toutefois les plus répandues en recherche comme par les opérationnels.

L'intérêt pour les appareils peu chers et dont les sources sont accessibles à tous a conduit au développement de nombreux projets technologiques open-sources. La littérature scientifique montre un intérêt croissant pour le développement de tels objets depuis le début des années 2010. Des appareils aux nombreuses utilités ont déjà été développés et parmi eux plusieurs sondes de turbidité.

## 2.3 Unités, normes et plage de mesure de la turbidité

La turbidité peut s'exprimer dans différentes unités en fonction des normes de mesures utilisées. Il n'existe pas de relation évidente entre la turbidité et les grandeurs du Système International d'unités. La turbidité peut varier en fonction de différents paramètres comme la nature des particules en suspension, leur taille, leur minéralogie, leur couleur, la longueur d'onde utilisée pour la mesure, etc. Les unités se rattachent donc à des normes établissant un protocole à suivre pour garantir l'écriture de la turbidité dans l'unité souhaitée.

Ainsi, la norme NF EN ISO 7027 (2000) traite de la détermination de la turbidité. Elle préconise des mesures effectuées avec un rayonnement devant être de  $860 \text{ nm} \pm 30 \text{ nm}$  ; « les résultats obtenus étant assez sensibles à la longueur d'onde » (ONEMA, 2015). Cette norme spécifie également les étalons à utiliser, des suspensions d'un polymère organique appelé la formazine de formule  $\text{C}_2\text{H}_4\text{N}_2$ . Deux mesures sont associées à cette norme : la FAU (Formazine Attenuation Unit) et la FNU (Formazine néphélométric unit) en fonction de la méthode utilisée.

Les NTU (Nephelometric Turbidity Units) sont une unité définie par l'Agence de Protection de l'Environnement (EPA) aux États-Unis qui correspond à une mesure par diffusion en lumière blanche. Bien que la majorité des sondes présentées dans la littérature et disponibles dans l'Annexe 1 fonctionne avec des LED infrarouges et ne respecte donc pas complètement cette norme, c'est l'unité la plus utilisée pour présenter les données.

Une quatrième unité, la FTU pour Formazin Turbidity Unit est aussi utilisée mais n'est pas normalisée. « Elle fait bien référence à l'étalon Formazine, mais ne donne aucune indication sur le principe de mesure utilisé. Elle peut être considérée comme une unité locale, propre à chaque utilisateur, qui interdit toute comparaison entre résultats obtenus par des utilisateurs différents » (ONEMA, 2015).

D'autres normes existent et sont présentées dans le tableau 2. La majorité d'entre elles se basent sur une mesure par néphélométrie mais utilisent des sources de lumière différentes. La sonde présentée dans ce travail ne suivant pas de norme particulière, les données seront présentées sous forme de tensions. Pour se raccorder à une norme, il suffira de calibrer la sonde avec des solutions étalons.

Norme	Source lumineuse	Méthode
EPA Method 180.1	Lampe tungstène avec une température de couleur de 2000 à 3000 K	Technologie néphélométrique qui mesure la lumière diffusée avec un angle de $90^\circ$ avec la source d'émission

ISO 7027	Source lumineuse monochromatique de longueur d'onde 860 nm et une bande de largeur de 60 nm	Nécessite un angle de 90° avec 2,5° d'erreur autorisés entre la source et le récepteur
Méthode Hach 10133	LED laser rouge de longueur d'onde 630 nm	Technologie néphélométrique qui mesure la lumière diffusée avec un angle de 90° avec la source d'émission
Méthodes standards 2130B	Lampe à filament tungstène avec une température de 2200 à 3000 K	Le photodétecteur doit être centré sur un angle de 90°
Atténuation lumineuse	Sources lumineuses infrarouges	Perte lumineuse entre une source et un capteur situé devant (180°)
Tube de turbidité	Lumière du soleil	Placer l'échantillon dans un tube avec le fond tourné vers le soleil et prendre la mesure lorsque le disque n'est plus visible.

**Tableau 2 : Normes encadrant la mesure de la turbidité (d'après J. Trevathan et al., 2020)**

En fonction du matériel utilisé, les sondes de turbidité bas-coût disposent de différentes plages de mesure pour lesquelles elles sont efficaces. Tandis que certains appareils cherchent à être performants dans un domaine de mesure précis comme celui des eaux potables où la turbidité est très faible et nécessite une précision importante comme celle proposée par *Theofanis P. Lambrou et al., 2013*, d'autres acceptent des plages plus importantes, souvent allant jusqu'à 1000 NTU et parfois 4000 NTU (*Jarrod Trevathan et al., 2020*).

Pour établir ces plages de mesure, différentes possibilités de calibration ont été étudiées selon les auteurs. Les solutions les plus communes sont l'utilisation d'une solution de calibration normée comme la formazine, la préparation de solution de concentrations connues ou le recours à une sonde de turbidité professionnelle sur laquelle un calage est effectué.

## 2.4 Encapsulage des sondes

Deux types de mesures peuvent être réalisés : la mesure par échantillons prélevés ou la mesure en insérant directement la sonde dans le liquide. Ces deux moyens influencent grandement l'encapsulage des sondes.

Pour les mesures par échantillons, l'encapsulage se présente surtout sous la forme d'un boîtier qui doit permettre d'accueillir un flacon contenant l'eau à analyser. La figure 3 est un exemple d'un encapsulage proposé par *Christopher D. Kelley et al., 2014*. Les montages peuvent prendre en compte la lumière parasite extérieure et proposer un encapsulage limitant au plus ces effets (*Zhenzhong Zang et al., 2020*). De nombreuses sources lumineuses ambiantes peuvent en effet produire des infrarouges parasites, le soleil étant souvent la source principale pour les sondes utilisées en extérieur.



Figure 3 : Sonde de turbidité open-source proposée par Christopher D. Kelley et al., 2014

Les sondes conçues pour les mesures en continu dans le liquide sont généralement longiforme (Theofanis P. Lambrou et al., 2013) comme à la figure 4. Cette forme est reprise des sondes professionnelles. Pour les sondes mesurant la turbidité dans une canalisation d'eau potable, présentant ainsi peu de problèmes d'encrassement, des encapsulages entourant le tuyau ont aussi été développés (David Gillett et al., 2019) comme celui présenté à la figure 5.

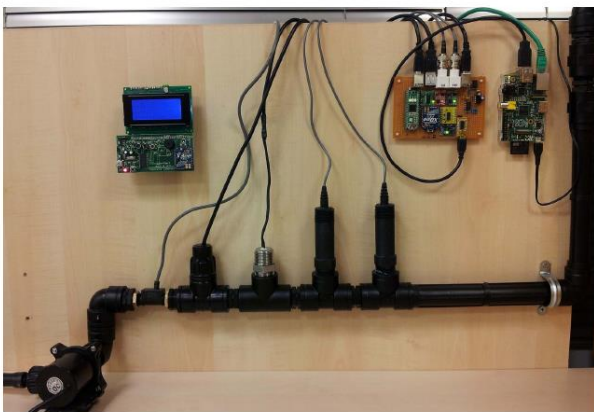


Figure 4 : Sonde de turbidité mesurant en continu dans une canalisation (Theofanis P. Lambrou et al., 2013)



Figure 5 : Sonde de turbidité entourant la canalisation (David Gillett et al., 2019)

## 2.5 Milieu d'étude, prix et limites

La plupart des sondes rencontrées dans la littérature ne sont testées qu'en laboratoire dans un environnement contrôlé. Ces tests conduisent à de bons résultats mais comme montré dans les chapitres suivants, les tests dans des conditions moins contrôlées aboutissent à des difficultés supplémentaires. Par exemple, bien que le test soit encore réalisé en laboratoire, le passage sur un système plus complexe du prototype développé par Gillett et al., 2019 a montré des difficultés lors de l'acquisition des données du fait de bulles pouvant gêner la lecture. Ce type de difficultés est assez peu abordé dans la littérature alors qu'elles semblent assez communes en métrologie et peuvent apporter des éclaircissements sur la manière de réaliser les sondes.

En ce qui concerne les prix, les sondes sont le plus souvent décrites comme peu chères ou low-cost. Cependant, les prix ne sont que rarement indiqués, ne permettant pas de donner une idée précise des dépenses engendrées. Lorsqu'un prix est indiqué, il ne comprend souvent qu'une partie du matériel, souvent le matériel électronique sans tenir compte de l'encapsulage ou de l'alimentation.

Ainsi, de nombreux modèles de sondes bas-coûts ont déjà été présentés dans la littérature scientifique, cherchant à répondre à différents besoins. Cependant, malgré des résultats satisfaisants, il apparaît que certains aspects comme la durée de vie du capteur ou l'évolution de la pertinence de la mesure dans le temps ne sont que très rarement abordés.

## 2.6 Comparaison des sondes professionnelles

Une comparaison de différentes sondes disponibles dans le commerce a aussi été réalisée et est présentée au tableau 3. On constate ainsi, que comme pour les sondes bas-coûts, l'utilisation de LED infrarouges est privilégiée mais avec des angles de mesure plus nombreux. Deux ou quatre angles de mesure sont souvent utilisés.

La lumière ambiante est souvent gérée par un encapsulage limitant les interférences du rayonnement solaire mais est aussi gérée en interne par des moyens électroniques non précisés par les constructeurs.

En ce qui concerne le fouling, différents accessoires peuvent être mis en place pour lutter contre. Un dispositif de balayage mécanique étant la solution la plus commune. La fréquence de balayage peut souvent être paramétrée en fonction de la rapidité de dépôt du milieu. Certaines sondes, comme celle vendue par Campbell Scientific, mettent en avant plusieurs moyens de lutte contre le fouling qui est l'une des causes principales d'entretien des sondes. La diversité des options proposées est donc un argument de vente intéressant à présenter

La gestion du fouling et de la lumière ambiante sont des problèmes récurrents que les sondes professionnelles abordent mieux que les sondes bas-coûts qui ne proposent généralement pas de solution face à ces perturbations extérieures.

Sur les neuf sondes comparées, cinq ont un prix supérieur à 4000 €, ce qui constitue un investissement conséquent. Cela représente plus de cinquante fois le prix d'une sonde bas-coût d'après les prix avancés dans les articles proposant un prix.

Une garantie est proposée pour plusieurs sondes professionnelles ainsi que des possibilités de retour au constructeur pour l'entretien et la vérification de la calibration. Ces services ont l'avantage d'éviter à l'utilisateur du matériel une perte de temps en manipulations non vouées à l'acquisition. Ce n'est évidemment pas le cas du matériel bas-coût qui lui impose une prise en main complète de l'utilisateur.

Sources	[13]	[14]	[15]	[16]	[17]	[18]	[19]	[20]	[21]
<b>Type de capteur</b>									
Néphélométrie (90°)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Atténuation (180°)	X					X			
Autres angles	X	X	X	X	X	X			

LED IR	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<b>Conception</b>									
Encapsulage	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Prise en compte du fouling	X	X	X		X	X	X		
Prise en compte de la température du milieu	X	X	X	X	X	X	X		X
<b>Mesure</b>									
Echantillon				X					
Mesure en continu	X	X	X		X	X	X	X	X
<b>Plages de mesure</b>									
0 - 10 NTU	X	X	X	X	X	X	X	X	X
10 – 100 NTU	X	X	X	X	X	X	X	X	X
100 – 200 NTU	X	X	X	X	X	X	X	X	X
200 – 1000 NTU	X	X	X	X	X	X	X	X	X
1000 – 4000 NTU	X	X		X			X	X	X
4000 – 8000 NTU									X
<b>Milieu d'étude</b>									
Laboratoire / Echantillons	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Milieu marin		X				X			
Milieu aquatique	X	X	X		X	X	X	X	X
<b>Prix</b>									
1000 – 2000 €								X	
2000 – 3000 €		X							
3000 – 4000 €			X	X					
4000 – 5000 €	X					X	X		
5000 € et plus					X	X	X		X
<b>Alimentation</b>									
Batterie				X				X	
Non indiquée	X	X	X		X	X	X		
Secteur									X
<b>Consommation</b>									
Non indiquée		X	X		X	X	X	X	X
40 mA	X								
60 MA				X					
<b>Durée de vie</b>									
Non estimée	X				X	X	X		

Garantie 2 ans		X	X	X				X	X
<b>Système de communication à distance</b>									
Non inclus	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<b>Lumière ambiante</b>									
Gérée par l'encapsulation	X	X	X		X	X	X	X	X
Non prise en compte / indiquée				X					
<b>Coût environnemental</b>									
Non évalué / indiqué	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<b>Lutte contre le Fouling</b>									
Ultrasons		X	X						
Essuie-glace	X				X	X			X
Biocide	X								
Cuivre	X								
Obturateur	X								
Non précisé				X			X	X	

**Tableau 3 : Tableau comparatif de différentes sondes de turbidité professionnelles disponibles dans le commerce**

**Sondes comparées :**

[13] Campbell Scientific, OBS501

[14] WTW, VisoTurb® 700 IQ (Existe en modèle marin SW)

[15] WTW, ViSolid® 700 IQ

[16] Hach Lange, TSS Portable Handheld instrument LXV322.99.00001

[17] Hach Lange, TSS W sc LXV324.99.30001

[18] Hach Lange, TSS W sc Différents modèles (16), similaires au précédent mais avec des caractéristiques variables

[19] OTT, Turbidity Sensor (Ce capteur est utilisé dans plusieurs sondes multi-paramètres de la marque)

[20] YSI, ProDSS Turbidity Sensor

[21] Endress-Hauser Liquisys M

### 3. Matériel et méthode

Comme expliqué précédemment, le principal intérêt du développement de ces sondes de turbidité est d'utiliser du matériel bas-coût et facilement accessible ; avec pour objectifs principaux la couverture de zones d'études plus étendues qu'avec du matériel classique pour un montant de dépenses comparable ; mais aussi permettre à un organisme ou un particulier intéressé par ce type de mesure, de se procurer du matériel fonctionnel à moindre coût.

#### 3.1 Principe de fonctionnement de la sonde

Il est nécessaire de définir en amont les contraintes de fonctionnement de la sonde de telle sorte à pouvoir mettre en place les composants électroniques et le code Arduino correspondant aux besoins.

La sonde doit être autonome et pouvoir assurer son alimentation en énergie sans avoir recours à une connexion en 220 V. Elle doit donc disposer d'une batterie et d'un moyen d'alimentation qui sera ici un panneau solaire.

Il n'est pas nécessaire que la sonde mesure la turbidité en continu durant toute sa période de fonctionnement. Une mesure à pas de temps régulier est suffisante et un pas de temps d'une dizaine de minutes semble ici suffisant d'après la littérature et les expériences précédentes portant sur la mesure de la turbidité. Cependant, cette mesure ne doit pas se résumer à la collecte d'une unique valeur toutes les dix minutes. En effet, il est possible que la valeur mesurée fluctue fortement sur un court laps de temps du fait des turbulences et des MES (Matières en suspension). Pour pallier ce problème, la sonde fait donc une acquisition sur une minute complète avec un pas de temps d'une seconde de sorte à obtenir une liste de soixante valeurs pour lesquelles quelques caractéristiques statistiques sont conservées (*Krieg Rabeski, 2018*). Cette durée d'acquisition donne une idée du signal moyen sur une minute suffisante pour mettre en évidence les variabilités propres au signal hydrologique lors d'une crue. Les caractéristiques mesurées sont la médiane, la moyenne, les valeurs minimales et maximales, les premier et troisième quartiles ainsi que la variance. Ces valeurs, auxquelles s'ajoutent l'horodatage ainsi que la température de l'eau, doivent assurer la fiabilité de la mesure. Toutes ces données doivent être a minima enregistrées sur une carte SD et si possible, envoyées sur une plateforme pouvant les stocker au moyen d'un système de connexion sans fil. L'objectif est ici d'avoir la possibilité d'accéder aux données sans devoir se rendre sur le lieu d'acquisition. Pour cela, la plateforme en ligne TTN (*The Things Network*) ainsi que le protocole LoRaWAN (*Long Range Wide-area network*) sont utilisés.

Dans un souci d'économie d'énergie de fonctionnement, le système doit pouvoir se mettre en veille lorsqu'il n'effectue pas sa mesure. Il doit pouvoir se rallumer à pas de temps régulier, ici une dizaine de minutes, et lancer l'acquisition de manière autonome.

Enfin, pour les raisons de surestimation de la turbidité par temps ensoleillé décrites dans la partie suivante, la mesure doit s'effectuer en deux temps : une première mesure avec la LED émettrice allumée et une seconde avec la LED éteinte. Ces deux mesures doivent ensuite être soustraites pour obtenir la valeur finale conservée. Tout ceci doit être contenu dans la seconde correspondant au pas de temps admis pour l'acquisition durant la minute décrite précédemment.



Toutes ces contraintes sont résumées dans le schéma de fonctionnement de la figure 6 qui correspond au déroulé du programme Arduino de l'annexe 1 implémenté dans la carte de la sonde.

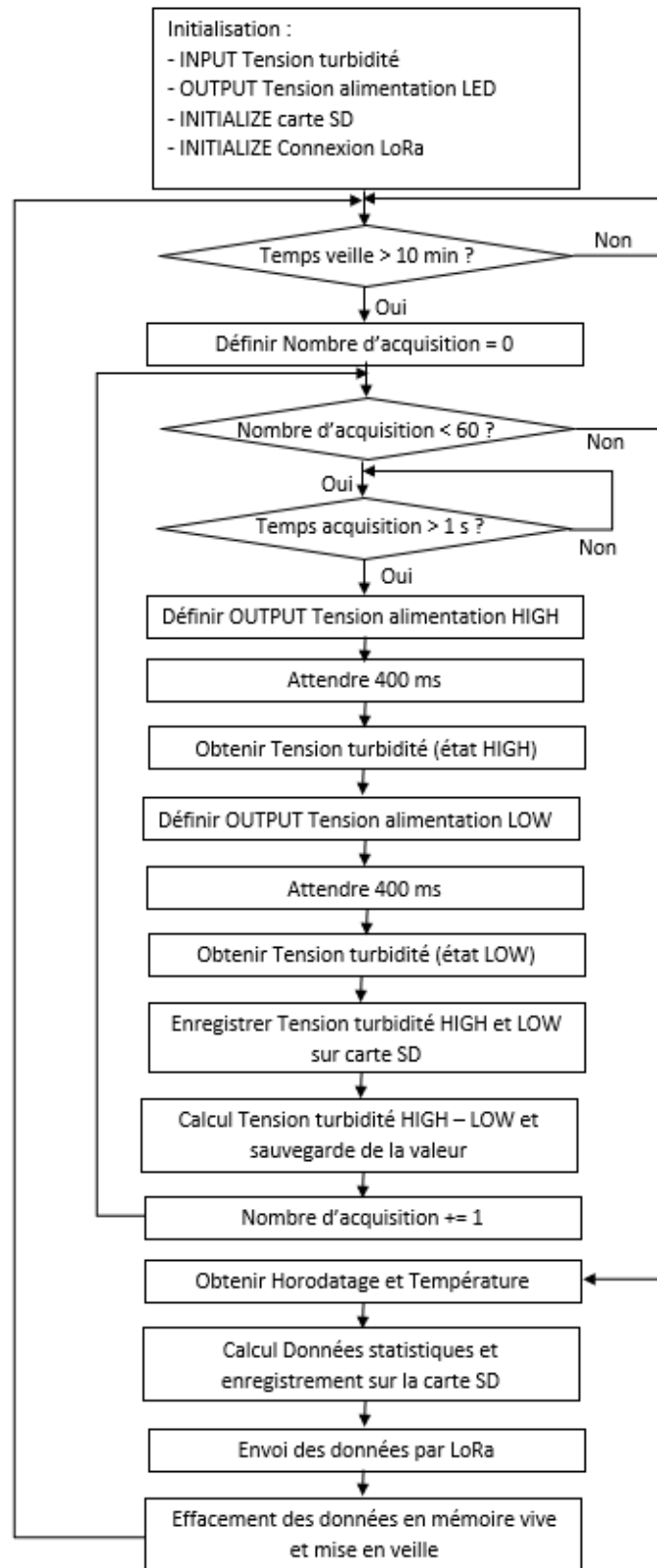


Figure 6 : Diagramme fonctionnel du programme Arduino

## 3.2 Présentation de la sonde de turbidité

La sonde de turbidité peut être décomposée en deux parties : la sonde en elle-même qui contient le capteur nécessaire pour effectuer la mesure et un boîtier d'acquisition pour transformer, enregistrer et transmettre la donnée tout en alimentant l'ensemble du dispositif par panneau solaire.

### 3.2.1 Sonde de turbidité

#### Capteur de turbidité

Le capteur de turbidité se base sur le capteur SKU SEN0189 (*Fiche technique SKU SEN0189*), vendu par l'entreprise DFRobot, spécialisée dans la vente de matériel électronique avec l'avantage d'être peu cher et facile à prendre en main. Il est composé d'une tête effectuant la mesure et d'une carte pouvant convertir la tension de sortie sous deux formes. Ce type de capteur est très souvent utilisé dans les lave-vaisselles et a déjà été utilisé sans modification dans d'autres projets de sondes bas-coûts (*Gillett et al., 2019*).

La tête se compose d'un circuit imprimé (figure 8), protégé par un capuchon en plastique transparent, sur lequel deux LED séparées d'un centimètre environ permettent la mesure de la turbidité par atténuation en fonctionnant dans le proche infrarouge (~930 nm). La LED émettrice est reliée à une résistance de valeur fixe protégeant la LED et d'un potentiomètre dont la valeur de résistance permet de faire varier l'intensité électrique parcourant la LED (voir figure 9 et 12). Ce potentiomètre est utile pour modifier la sensibilité du capteur.

Cette tête est reliée à une carte permettant la conversion du signal sous forme analogique ou digitale (figure 7). Le signal sous forme analogique est un signal dont la valeur est proportionnelle à l'intensité du courant. C'est cette forme de signal qui est utilisée pour l'acquisition des données. Le signal digital, lui, est un signal binaire qui ne peut prendre que deux formes : 0 ou 1. Il ne transmet donc qu'un état dont la valeur de basculement peut être choisie au moyen du potentiomètre de la carte. L'acquisition sous forme analogique ne nécessite pas particulièrement l'utilisation de cette carte, car la tension en entrée de celle-ci est la même que celle en sortie, à la différence de l'utilisation sous forme digitale. Toutefois, la carte est laissée dans le montage en cas d'une possible utilité dans le futur.

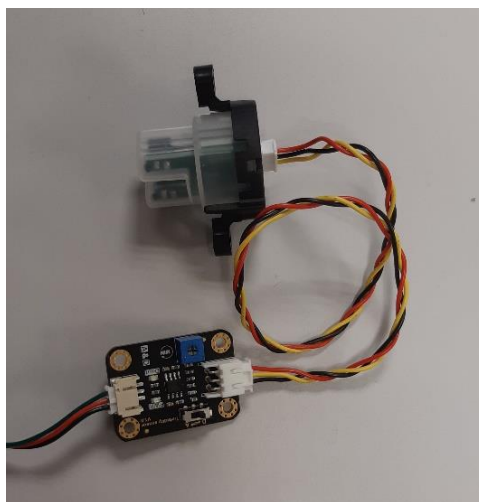
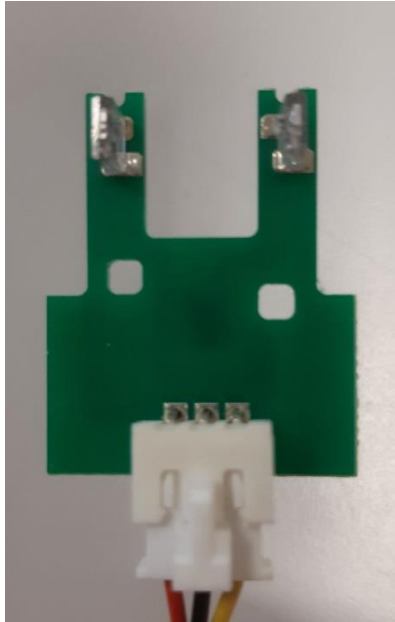


Figure 7 : Capteur de turbidité SKU SEN0189

## **Modifications du capteur de turbidité**

Bien que fonctionnel dans son état d'origine, ce capteur dispose de deux inconvénients majeurs : la tête qui effectue la mesure n'est pas étanche, ce qui pose un problème pour du matériel devant être immergé et les LED d'origine du capteur sont sensibles à la lumière du soleil. Ainsi, par beau temps, la sonde peut envoyer une valeur surestimée de la turbidité réelle du fait de l'addition de la lumière du soleil à celle de la LED émettrice.

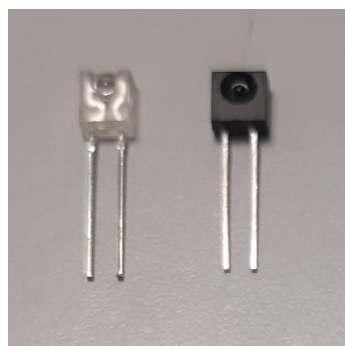


**Figure 8 : Circuit imprimé d'origine (vue du dessus)**



**Figure 9 : Circuit d'origine imprimé (vue du dessous)**

Pour parer ce problème de surestimation de la turbidité, les LED initialement présentes sur la carte de circuit imprimé verte sont remplacées par des LED moins sensibles à la lumière ambiante (figure 10 et 11) et particulièrement aux infrarouges du fait d'un revêtement filtrant en partie les rayonnements parasites. Ces LED, TEKT5400S pour la LED réceptrice et QEE113 pour l'émettrice, fonctionnent pour des longueurs d'ondes centrées autour de 940 nm avec un angle d'émission de 50° pour la LED émettrice. La LED réceptrice, elle, fonctionne pour des longueurs d'onde comprises entre 860 nm et 980 nm.



**Figure 10 : LED émettrice QEE113 (blanche) et réceptrice TEKT5400S (noire)**

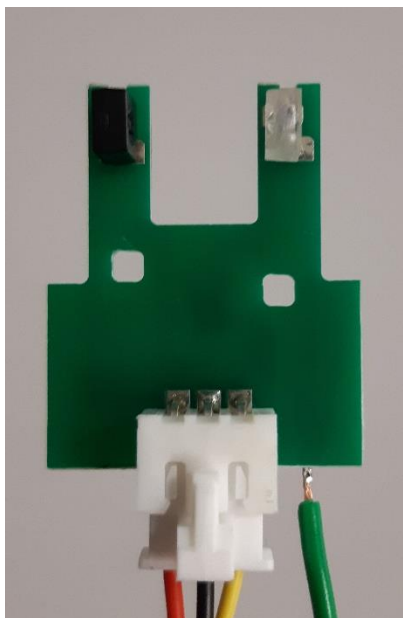


Figure 11 : Circuit imprimé modifié (vue du dessus)

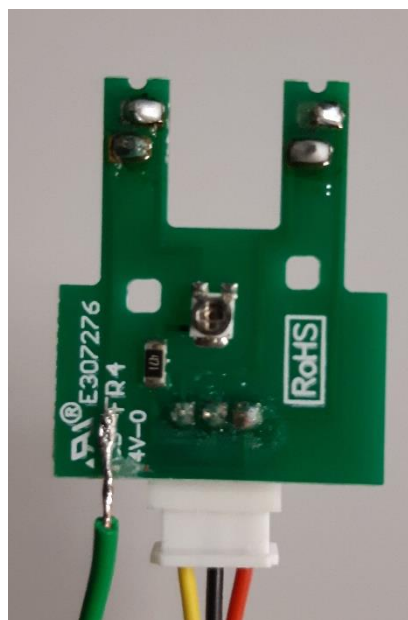


Figure 12 : Circuit imprimé modifié (vue du dessous)

Cette réduction de la sensibilité aux infrarouges ambiants entraîne une réduction de la sensibilité globale du capteur par rapport à sa version d'origine pour une même intensité de courant. Mais cette baisse peut être compensée par la réduction de la valeur de la résistance du potentiomètre. Ainsi, selon la loi d'Ohm, la tension est proportionnelle au produit de la résistance et de l'intensité. La valeur de la résistance étant diminuée et celle de la tension fixée par la carte Arduino, l'intensité électrique parcourant la LED est plus importante et entraîne une augmentation de l'émission lumineuse de cette dernière qui compense l'atténuation globale.

A cette modification des LED s'ajoute une modification majeure dans le circuit électrique. Dans sa version initiale, les deux LED sont alimentées en continu par la même entrée de courant alors que dans le prototype développé, l'alimentation des LED est séparée. Cette modification est faite en coupant la branche du circuit imprimé alimentant la diode émettrice pour la relier à un fil électrique ajouté et soudé à la carte. Cette modification est visible sur la figure 12. Ce changement a pour objectif de pouvoir asservir l'alimentation de la diode émettrice à l'aide de la carte Arduino située dans le boîtier d'acquisition. La diode est alors alimentée par un signal créneau prenant pour valeurs soit la tension que la carte Arduino propose (3,3 V ou 5V selon les modèles) soit 0 V. Au moyen du programme présenté en annexe 1 téléversé dans la carte Arduino, une mesure de turbidité est effectuée lorsque la LED émettrice est sous tension et une autre lorsqu'elle ne l'est pas. Cela a pour conséquence l'obtention d'une valeur de turbidité mesurée à partir des infrarouges émis par la LED émettrice et ceux de l'environnement et une seconde mesure dont la valeur correspond aux seules émissions de l'environnement. La soustraction de la seconde valeur à la première permet alors de supprimer les effets du soleil et donc de conserver une valeur finale compensée. C'est ce principe de compensation de la lumière ambiante du soleil qui a surtout été testé lors des expériences en laboratoire.

## **Capteur de température**

La partie de la sonde permettant la mesure de la turbidité contient en réalité deux capteurs. En plus du capteur de turbidité, une sonde étanche de température DS18B20 visible sur la figure 13 est incorporée au circuit électrique. Cette sonde est capable de mesurer des températures allant de -55 °C à +125 °C avec une précision de 0,5 % pour l'intervalle [-10 ; +85 °C] (*Fiche Technique DS18B20*), ce qui est suffisant en termes de précision attendue. Elle a déjà été éprouvée sur le terrain et les résultats obtenus étant jugé concluant (*L. Maurer, 2018*), les données acquises ici sont jugées comme fiables. L'acquisition de la température est utile en métrologie. Elle peut notamment servir à expliquer certaines évolutions dans les valeurs de turbidité collectées. Elle est aussi nécessaire pour éviter une dérive de la valeur de la turbidité avec la température (*Krieg Rabeski, 2018*).



**Figure 13 : Capteur de température DS18B20**

La sonde de température n'est pas plongée directement dans l'eau dans ce montage mais est située dans l'encapsulage, à proximité de la tête pour la mesure de turbidité. Un écart peut alors exister entre la valeur réelle et la valeur mesurée mais il est jugé acceptable aux vues de la précision attendue. La température est en effet ici un paramètre indicatif qui n'a pas vocation à être d'une grande précision. Ce choix de positionner le capteur de température à l'intérieur de l'encapsulage est aussi motivé par le matériel en lui-même. En effet, la câblage étanche de la sonde de température à disposition est trop court pour permettre une installation extérieure reliée au boîtier d'acquisition.

## **Encapsulage**

En ce qui concerne l'étanchéité de la sonde, celle-ci est assurée lors de la réalisation de l'encapsulage. Cet encapsulage est réalisé à partir de pièces en PVC utilisées en plomberie. Ce choix de matériau se justifie par sa facilité d'obtention, son faible coût et sa robustesse.

La tête de la sonde est, elle, composée d'une augmentation femelle/femelle du 32 mm vers le 40 mm dont la partie 32 mm est découpée à moitié pour faciliter la mesure tout en protégeant la tête de la sonde par la partie restante (figure 14 et 15). En effet, cette augmentation accueille la partie en plastique transparent du capteur de turbidité SKU SEN0189 qui est collée et dont l'étanchéité est assurée par l'ajout d'un joint de silicone à l'intérieur comme à l'extérieur de la pièce. Cette pièce composée de l'augmentation et de la tête transparente est raccordée au tube

du corps de la sonde par un tampon de visite de 40 mm évidé suffisamment pour laisser passer la carte électronique portant les LED. L'utilisation de ce tampon de visite plutôt qu'un collage des deux parties permet d'accéder à cette carte facilement et de pouvoir modifier la valeur de la résistance du potentiomètre qui s'y trouve. Cette zone est la plus fragile de la sonde car le tampon de visite n'est pas prévu pour accueillir une pièce sur son couvercle. Le collage se fait donc sur une surface réduite et bien que la colle PVC utilisée assure une certaine solidité à l'assemblage, celui-ci est renforcé par une bande d'adhésif étanche lorsque la sonde est installée sur le terrain.

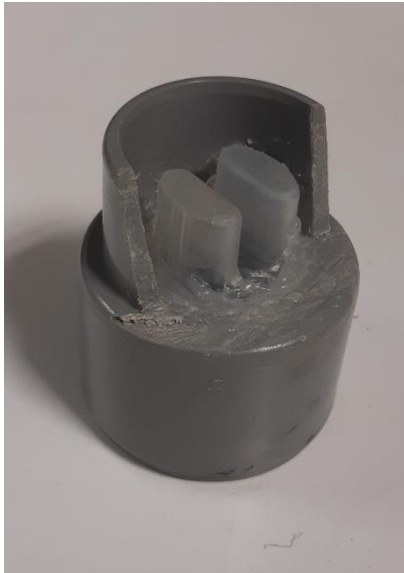


Figure 14 : Tête de la sonde (vue du dessus)

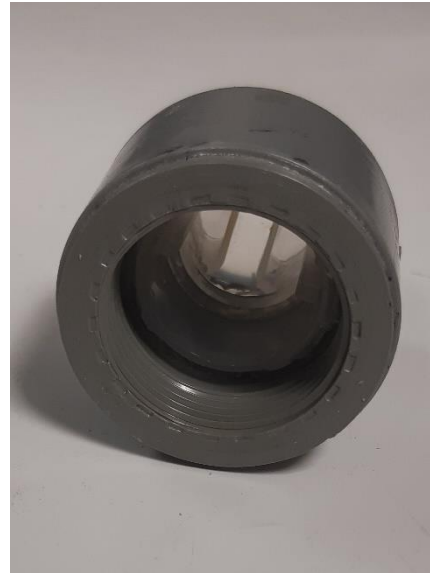


Figure 15 : Tête de la sonde (vue du dessous)

Le corps de la sonde est principalement constitué d'un tube de PVC de 40 mm de diamètre et d'une trentaine de centimètres de long (figure 17). Cette longueur et ce diamètre sont suffisants pour accueillir l'ensemble des composants électroniques nécessaires. Ce corps se termine par un manchon femelle/femelle en 40 mm auquel est raccordé un tampon de visite en 40 mm, percé en son centre pour y insérer un presse-étoupe (figure 16). Ce presse-étoupe permet de faire passer le câble électrique connectant la sonde au boîtier d'acquisition tout en conservant la sonde étanche. Ce design s'inspire de celui déjà mis en place lors d'un stage précédent portant lui aussi sur la turbidité (Maurer L., 2018).



Figure 16 : Arrière de la sonde



Figure 17 : Corps de la sonde

La sonde est finalement reliée au boîtier d'acquisition par un câble d'instrumentation à quatre fils. Le capteur de température nécessite l'utilisation de trois fils (l'alimentation, la masse et la donnée) et le capteur de turbidité quatre fils (un pour l'alimentation de chacune des LED, un

pour la masse et un pour la donnée). Avec les masses mises en commun ainsi que l'alimentation de la LED réceptrice avec le capteur de température, il n'est plus nécessaire que d'utiliser 5 fils. La gaine métallique du câble d'instrumentation est alors en partie détressée et sert de cinquième câble utilisé pour la masse.

### 3.2.2 Boîtier d'acquisition et alimentation

#### Encapsulage

Le boîtier d'acquisition, visible figure 19, est composé d'un manchon femelle/femelle de 100 mm fermé à chaque extrémité par un tampon de visite de même diamètre. L'un des deux tampons est percé de deux trous bouchés par des presse-étoupes laissant passer le câble de la sonde de turbidité et celui du panneau solaire. En effet, le prototype dispose de son propre système d'alimentation afin de le rendre autonome et faciliter une installation sur le terrain en étant indépendant de toute alimentation en réseau. Le panneau solaire utilisé d'une dimension de 10 cm par 10 cm est suffisant pour alimenter le système et recharger la batterie rangée dans le boîtier d'acquisition. Cette batterie de 3,8 V a une capacité de 5100 mAh ; caractéristiques suffisantes pour alimenter la sonde plusieurs jours sans qu'elle doive être rechargée par le panneau solaire. Celui-ci est aussi collé sur un support composé d'un tube PVC et d'une plaque de plastique permettant de l'accrocher plus facilement comme apparent à la figure 18.

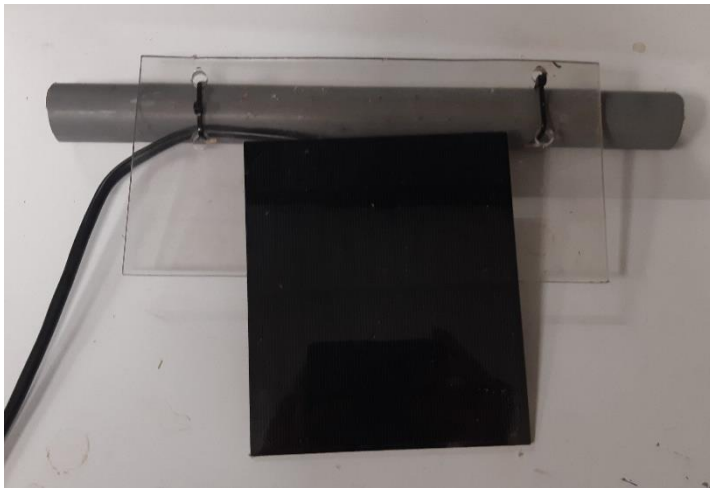


Figure 18 : Panneau solaire alimentant la sonde



Figure 19 : Boîtier d'acquisition ouvert

En ce qui concerne la partie électronique, plusieurs composants électroniques sont nécessaires au bon fonctionnement du système.

#### Microcontrôleur

La carte Arduino est le composant principale puisque c'est elle qui contient le microcontrôleur exécutant le code nécessaire à l'acquisition des données. La carte utilisée est une carte Arduino MKR WAN 1300 ou 1310 (figure 20) selon les versions. Elle se différencie des autres cartes de ce constructeur par la présence d'une puce et d'une antenne autorisant l'utilisation du protocole de communication LoRaWAN (*Long Range Wide-area network*) ainsi que par une tension de fonctionnement de 3,3 V.





Figure 20 : Carte Arduino MKR Wan 1310 avec son antenne

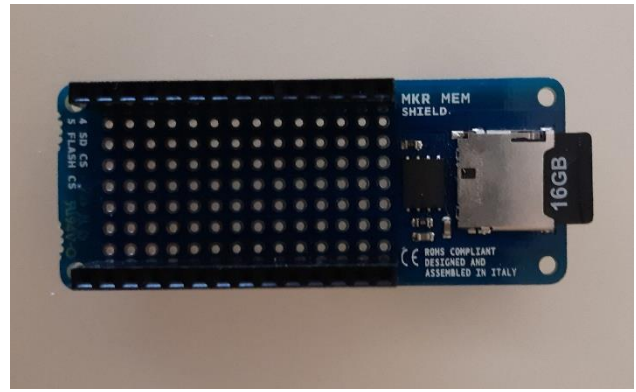


Figure 21 : MKR Mem Shield pour Arduino MKR

### **Transmission des données (TTN et LoRaWAN)**

D'après le site de l'association promouvant le déploiement du réseau LoRa (*site de LoRa Alliance*), « la spécification LoRaWAN® est un protocole de mise en réseau LPWA (Low Power Wide Area) conçu pour connecter sans fil des objets fonctionnant sur batterie à l'internet dans des réseaux régionaux, nationaux ou mondiaux ». Les données sont transmises au moyen d'ondes radio propagées par des antennes spécifiques à ce protocole. Une antenne déjà installée sur le site d'étude de Chassieu par l'équipe de l'OTHU permet à la sonde de transmettre ses données. Pour la réception des données, le site internet The Things Network (TTN) est utilisé. « TTN est un réseau LoRaWAN communautaire et open source pour l'Internet des Objets (IoT en anglais) » (*site de TTN*). Ce site permet la création d'application dans lesquelles peuvent être enregistrés des appareils à partir de leurs identifiants. Une fois ces identifiants renseignés, il est alors possible d'accéder aux données transmises et de les enregistrer sous différentes formes. Le moyen d'enregistrement retenu ici est un tableur sur Google Drive. Cette méthode a l'avantage d'être accessible sur différents appareils, de pouvoir partager les données avec plusieurs collaborateurs, de modifier les données et de les afficher sous forme de graphiques. Pour assurer la connexion entre TTN et la Google Sheet, il est nécessaire de développer un code en Javascript à insérer dans l'éditeur de script de la feuille.

Une intégration des données sur la plateforme de Cheap'Eau, OpenDataEau, a été envisagée en plus de l'enregistrement sur Drive. Cette plateforme a pour vocation de concentrer les résultats des différents capteurs développés par les membres de Cheap'Eau et de les rendre accessibles. Toutefois, des difficultés dans l'intégration des données produites par la sonde ont été rencontrées et ont conduit à son abandon temporaire.

### **Carte SD**

En plus de la sauvegarde des données aux moyens d'une Google Sheet, ces dernières sont aussi sauvegardées sur une carte SD. Pour cela, un MKR Mem shield (figure 21) produit par Arduino est utilisé. Ce shield s'emboîte dans les pins de la carte MKR tout en proposant les mêmes pins sur sa propre carte. Cela permet de laisser la possibilité d'effectuer d'autres branchements sur la carte Arduino. Un seul des pins, le pin 4, est réservé pour le transfert des données entre la carte MKR et le shield SD. Une carte SD de 16 Go est utilisée ; cette capacité de stockage accorde



une certaine durée d'acquisition avant que la carte ne soit saturée, ce qui peut être utile pour des systèmes non visités régulièrement.

### **Horloge Temps Réel**

Une Horloge Temps Réel (HTR) ou RTC en anglais pour *Real Time Clock* est utilisée dans le circuit pour indiquer précisément l'heure à laquelle les données sont produites. Le composant dont le modèle utilisé est un DS3231, dispose de sa propre pile bouton pour conserver l'information sur l'heure enregistrée. Cette information doit être fournie au composant par le biais d'un programme Arduino disponible dans la bibliothèque relative à ce composant. Le programme doit être téléversé en amont de celui utile au fonctionnement de la sonde. Ce composant est visible sur la figure 22, monté à la verticale sur la platine.

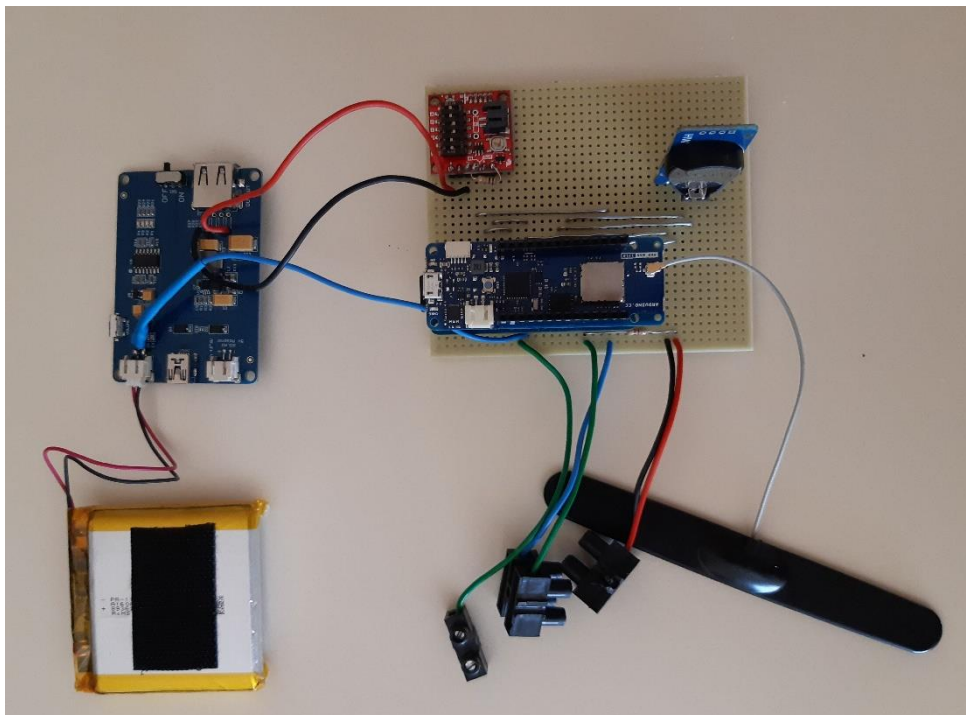


Figure 22 : Montage électrique du boîtier d'acquisition

### **Nanotimer**

Le circuit utilise aussi un NanoTimer SparkFun Nano Power Timer - TPL5110, composant rouge visible sur la figure 22. Ce composant a pour objectif de réduire la consommation d'énergie du système, notamment en l'éteignant selon un temps modulable par les leviers présents sur le circuit imprimé. C'est donc ce composant qui gère l'alimentation de la carte Arduino. La méthode de sélection de la période de veille se faisant par palier en fonction des leviers activés ou non, il n'est pas possible de choisir des durées de veille précises. Le choix se fait entre plusieurs valeurs allant de quelques secondes à un quart d'heure environ. Plusieurs essais de combinaisons différentes ont montré que les temps de veille indiqués dans la notice du composant étaient assez relatifs et que des écarts importants pouvaient être relevés. Ainsi par exemple, alors que la documentation indique une durée de veille de 5 min pour une combinaison déterminée, un temps réel de moins de 3 min a été observé et ce à plusieurs reprises et pour plusieurs composants différents. Les temps indiqués ne sont pas entièrement fiables mais leur durée réelle est assez stable dans le temps. Dans le cas de la sonde de

turbidité, un pas de temps de dix minutes avait initialement été retenu entre chaque mesure. Selon les capacités du nanotimer, un temps de huit minutes a finalement été retenu qui s'avère être plus proche des 6 min 30 s en réalité. Ce composant, malgré ces écarts a été conservé car peu cher et facile à utiliser. Un montage électrique fait à partir de composants plus basiques aurait pu permettre une meilleure fiabilité dans les temps de veille mais aurait nécessité un temps de développement assez conséquent et occuperait un espace plus important qu'un circuit imprimé ; d'autant que la place dans le boîtier d'acquisition est limitée. Ce composant est donc satisfaisant dans le cadre des tests actuels de la sonde, mais ce manque de précision peut rendre la comparaison avec d'autres données à pas de temps plus précis un peu plus laborieuse qu'avec un composant aux réglages précis.

### **Alimentation LiPo Rider**

L'alimentation du nanotimer se fait au travers d'une carte d'alimentation LiPo Rider Pro 106990008 reliant le panneau solaire et la batterie avec le nanotimer. Elle est visible sur la gauche de la figure 22. Un pont diviseur de tension est soudé en sortie de la batterie pour mesurer sa tension avec la carte Arduino afin de connaître son niveau de charge et s'assurer de la bonne alimentation du système.

### **Assemblage**

Les différents composants présentés précédemment sont soudés sur une platine de prototypage. Ce type de platine permet de relier facilement et rapidement différents composants tout en limitant le nombre de raccords à ajouter. En effet, la carte est parsemée de trous afin d'y insérer les composants et ces trous sont liés par des bandes métalliques entre eux, ce qui assure la continuité électrique. Il faut alors ajouter des connexions nécessaires entre les différentes bandes pour relier les composants et effectuer des coupures là où le courant ne doit pas passer. Cette platine a remplacé un premier modèle dans lequel les différents composants étaient vissés à une plaque de plastique et reliés entre eux par des jumpers et des câbles pour le développement de projets rapides. Ce premier modèle a permis de confirmer le fonctionnement des branchements réalisés mais a aussi montré la nécessité de liaisons solides. De nombreux faux-contacts ont posé problèmes lors des premières acquisitions et ont conduit à l'utilisation d'une platine, solution plus fiable et plus pérenne.

Le montage final, dont le schéma électrique est disponible à la figure 23, est donc assez simple à réaliser avec des ressources accessibles à tous.

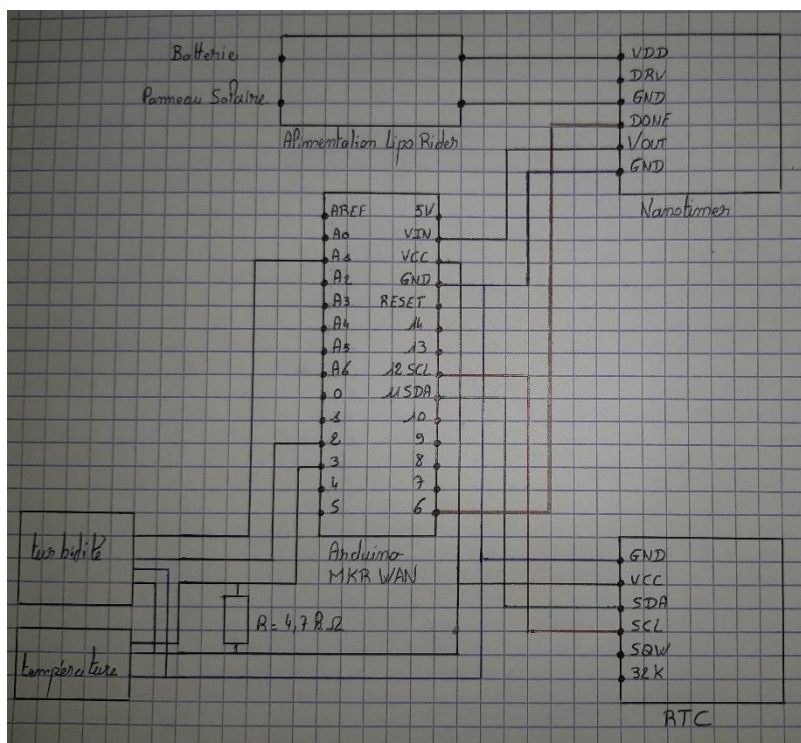


Figure 23 : Schéma électrique de la sonde

### 3.2.3 Estimation du prix de la sonde

Un des points essentiels pris en considération dans le développement de cette sonde est le coût global de l'appareil. La sonde doit être fiable tout en ayant un coût suffisamment faible pour permettre la création de plusieurs unités à moindre frais. Ce faible coût est aussi un enjeu pour son accessibilité à un large public.

Les prix des différents composants sont présentés dans le tableau 4 ci-après et correspondant aux prix pratiqués à l'été 2021.

Composant	Prix unitaire	Quantité	Prix total
<b>Composants électroniques du boîtier d'acquisition</b>			
Carte Arduino MKR 1300	42,00 €	1	42,00 €
MKR Mem Shield	21,90 €	1	21,90 €
RTC DS3231	6,99 €	1	6,99 €
SparkFun Nano Power Timer - TPL5110	7,40 €	1	7,40 €
Carte alimentation LiPo Rider Pro 106990008	15,60 €	1	15,60 €
Batterie LiPo 3.7V 5200 mAh.	24,95 €	1	24,95 €
Panneau solaire	11,95 €	1	11,95 €
<b>Encapsulage du boîtier d'acquisition</b>			
Manchon femelle/femelle diam. 100 mm	1,12 €	1	1,12 €
Tampon de visite diam. 100 mm	2,90 €	2	5,80 €
Presse-étoupe	4,75 €	2	9,50 €

Composants électroniques du capteur de turbidité			
Sonde étanche de température DS18B20	7,95 €	1	7,95 €
Capteur de turbidité SKU SEN0189	11,30 €	1	11,30 €
LED émettrice	0,79 €	1	0,79 €
LED réceptrice	0,59 €	1	0,59 €
Câble d'instrumentation 4 fils (10 m)	30,57 €	1	30,57 €
Encapsulage du capteur de turbidité			
Tuyau PVC diam. 40 mm 2 m	5,10 €	1	5,10 €
Manchon femelle/femelle diam. 40 mm	0,40 €	1	0,40 €
Tampon de visite diam. 40 mm	0,80 €	2	1,60 €
Presse-étoupe	4,75 €	1	4,75 €
Augmentation femelle/femelle 32/40 mm	1,30 €	1	1,30 €
Total			211,96 €

**Tableau 4 : Prix des différents constituants de la sonde**

Bien que ce tableau reprenne la majorité des éléments constitutifs de la sonde, il ne prend pas en compte certaines dépenses comme la nécessité de colle PVC, du fil pour réaliser les liaisons sur la platine, l'étain ou encore le poste à souder. Aussi, certains des éléments du tableau sont vendus par lots ou avec une longueur donnée supérieure à celle requise pour une seule sonde. Cela conduit à une estimation approximative du prix pour ces articles mais donne cependant une idée de l'ordre de grandeur du prix d'une telle sonde qui peut alors être établi autour de 200 à 250 €.

Ce prix est une vingtaine de fois inférieur à celui d'une sonde professionnelle. L'objectif de développer une sonde bas-coût est donc ici satisfait. Avant d'être installée sur le terrain, la sonde a été testée au laboratoire pour s'assurer de son fonctionnement.

### 3.3 Tests en laboratoire

La sonde a été testée en plusieurs étapes au laboratoire au cours de son élaboration. Les premiers tests avaient pour objectif de confirmer l'utilité du changement des LED et de l'asservissement de l'alimentation de la LED émettrice.

#### 3.3.1 Test des modifications apportées à la tête de la sonde

Lors de ces tests, l'encapsulage de la sonde est assez similaire à son modèle final mais ne dispose pas encore du pas de vis au niveau de la tête qui est alors seulement emboîtée dans le corps de la sonde. Seule la tête de la sonde est à ce moment immergée lors des mesures. Au total, lors de ces tests, quatre sondes sont utilisées ; deux sondes bas-coût, l'une avec le capteur non modifié et l'autre avec le capteur modifié et deux sondes professionnelles : une sonde

WTW VisoTurb (figure 24) optimale pour les mesures dans les eaux peu turbides et une sonde Endress-Hauser (figure 25) avec une large plage de mesure, capable de mesurer des turbidités allant jusqu'à 8000 NTU.



Figure 24 : Sonde WTW VisoTurb



Figure 25 : Sonde Endress-Hauser

Ces sondes professionnelles permettent de comparer les résultats obtenus, notamment au niveau de l'erreur relative. Elles disposent chacune de leur propre boîtier avec un écran affichant les valeurs mesurées de turbidité et de température entre autres. Ces boîtiers permettent aussi d'enregistrer directement les données mais cette fonctionnalité n'a pas été utilisée, au profit de l'utilisation de la sortie 4 – 20 mA. Cette sortie permet de transmettre la valeur de la turbidité sur une plage d'intensité où 4 mA correspond à la valeur minimale soit 0 NTU et 20 mA à la valeur maximale dépendant des paramètres de la sonde (4000 NTU pour la sonde WTW et 8000 NTU pour la Endress-Hauser). Ces sorties 4 – 20 mA sont reliées à une carte Arduino Uno sur laquelle est téléversé un programme enregistrant les données de turbidité toutes les secondes. Les deux sondes bas-coût sont aussi reliées à cette carte Uno. La carte Uno enregistre les données directement sur l'ordinateur auquel elle est reliée, lui servant en même temps de source d'alimentation. Aucun des composants présentés dans la partie consacrée au boîtier d'acquisition n'est encore mis en place. L'objectif est ici de tester uniquement le capteur.

Pour tester les LED, les différentes sondes sont plongées dans un seau noir et mat, ce qui limite les possibles réflexions de lumière pouvant altérer les mesures. Le seau est rempli d'une solution composée de sédiments en suspension. Ces sédiments sont issus de prélèvements effectués en Nouvelle-Calédonie qui ont été tamisés pour ne conserver que les sédiments les plus fins, dont le diamètre est inférieur à 63  $\mu\text{m}$ . Cela permet d'avoir une solution homogène. Trois solutions de différentes concentrations sont utilisées permettant de tester différentes gammes de turbidité : une solution composée d'eau du robinet, dont la turbidité n'excède pas 1 NTU, une solution avec une concentration de 0,75  $\text{g.l}^{-1}$  pour les faibles turbidités et une solution à 10  $\text{g.l}^{-1}$  pour les fortes turbidités. Les solutions utilisées sont un réemploi de solutions préparées par d'autres étudiants ayant eux aussi travaillé sur la turbidité (Maurer, 2018 et Krieg Rabeski, 2018).

L'ensemble de cette installation est placé sur un chariot visible à la figure 26, ce qui permet de déplacer le dispositif à l'ombre et à la lumière ambiante extérieure lors des mesures. Ainsi, le protocole de mesure s'établit comme suit : une solution est versée dans le seau puis les acquisitions sont lancées pour les quatre sondes à l'ombre. Une fois l'acquisition terminée, le



chariot est exposé à la lumière du soleil et les mesures sont relancées. On peut alors comparer la réaction des sondes selon l'exposition lumineuse à laquelle elles sont soumises.

Il a aussi été testé que les quatre sondes fonctionnant en même temps ne s'influencent pas entre-elles lors de leurs acquisitions. Pour cela, des mesures avec les sondes isolées puis regroupées ont été réalisées. Les résultats obtenus ne montrent pas de variation particulière lors des différents essais. Cela s'explique par le fait que les sondes émettent dans des longueurs d'onde différentes, allant d'environ 850 à 950 nm selon les modèles. De plus, malgré la diffusion sur les sédiments, celle-ci semble suffisamment ténue pour ne pas influencer les sondes qui sont séparées d'une petite dizaine de centimètres les unes des autres sur une seule ligne.



**Figure 26 : Chariot de test des sondes de turbidité**

### **3.3.2 Test du boîtier d'acquisition et fonctionnement dans le temps**

Une fois le capteur fonctionnel, le boîtier d'acquisition a été développé. Pour cela, la carte Arduino Uno initialement utilisée a été remplacée par une carte Arduino MKR Wan 1300 et différents composants décrits précédemment ajoutés. Une fois l'assemblage terminé, celui-ci a été testé pour s'assurer que l'acquisition soit régulière. Il a alors été remarqué que le temps entre chaque acquisition n'était pas exactement le même, le temps de veille entre deux mesures pouvant varier légèrement. A cela s'ajoute le fait que lors de l'initialisation de la connexion LoRa, une incapacité de la carte à établir le lien entraîne un retard dans le lancement de l'acquisition. La carte peut essayer plusieurs fois d'établir la connexion en cas d'échec.

Malgré cette variation, la sonde effectue bien son acquisition toutes les huit minutes environ et enregistre correctement les informations sur la carte SD. La sonde a été testée seule sur

plusieurs jours, fonctionnant uniquement sur la réserve de sa batterie dans l'obscurité au laboratoire. La solution a été brassée à différents intervalles de temps pour compenser la décantation des sédiments.

### 3.4 Zone d'étude

L'ensemble des résultats des tests de la sonde in situ présentés au chapitre suivant ont été obtenus par l'installation de sondes de turbidité sur le site Django Reinhardt de Chassieu.

#### 3.4.1 Présentation du site Django Reinhardt de Chassieu

Le site Django Reinhardt, situé dans la zone industrielle de Chassieu (voir figure 30), recueille principalement les eaux pluviales drainées sur un bassin versant de 185 ha (site du *GRAIE, Présentation des sites*). A ces eaux pluviales s'ajoutent périodiquement les eaux de temps sec, correspondant aux rejets industriels de process. Les deux bassins du site ont été réhabilités par le Grand Lyon en 2002, conduisant à la mise en service d'un bassin de rétention d'une capacité de 32 000 m<sup>3</sup> visible sur la figure 27 et d'un bassin d'infiltration d'une capacité » de 61 000 m<sup>3</sup>, sur la figure 28. L'arrivée des eaux pluviales dans le bassin de rétention se fait par deux canalisations et une troisième permet des surverses occasionnelles dans le bassin d'infiltration comme présenté par le schéma de la figure 29.



Figure 27 : Bassin de rétention du site Django Reinhardt (1er juin 2021)



Figure 28 : Bassin d'infiltration du site Django Reinhardt (1er juin 2021)

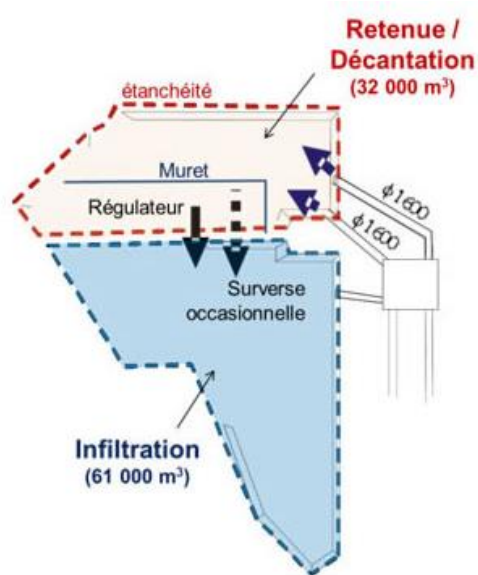


Figure 29 : Schéma de situation du site Django Reinhardt (GRAIE, Présentation des sites)

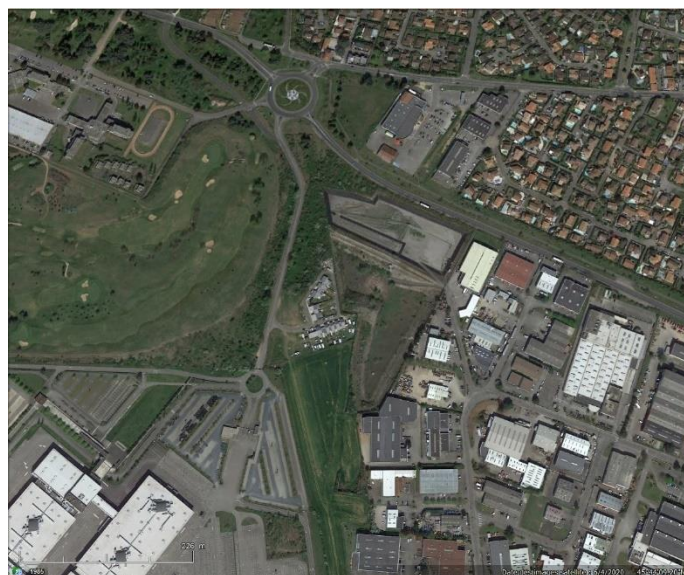


Figure 30 : Situation géographique du site (Google Earth)

Les bassins de Django Reinhardt sont un des sites pilotes de l'OTHU (N. Walcker et al., 2018) pour lequel plusieurs infrastructures sont mises en place afin de faciliter l'installation de matériel de mesure. C'est principalement pour cette raison que le capteur de turbidité a été testé sur ce site. De plus, sa relative proximité avec le laboratoire EVS (environ un quart d'heure en voiture) est aussi un avantage pour pouvoir intervenir rapidement en cas d'anomalies détectées dans les données transmises par la sonde.

La sonde de turbidité a été installée successivement en trois endroits différents en fonction des difficultés rencontrées dans l'acquisition de la mesure.

### 3.4.2 Installation dans le bungalow du bassin d'infiltration

La première installation s'est effectuée dans un des bungalows de l'OTHU. En effet, deux stations de mesure OTHU se présentant sous la forme de bungalows sont installées sur le site ; l'une au niveau du bassin de rétention, l'autre au niveau du bassin d'infiltration. La figure 31 est une photographie du bungalow du bassin de rétention.





Figure 31 : Bungalow de mesure OTHU du bassin de rétention (1er juin 2021)

Ces bungalows sont principalement composés d'un canal de mesure dans lequel circule de l'eau prélevée par une pompe depuis les bassins. Le bassin n'est mis en eau que lors des événements pluvieux, détectés par la mesure de la hauteur d'eau dans les canalisations du bassin. Le canal est élaboré de telle sorte à pouvoir y mettre en place plusieurs sondes reliées à un ordinateur permettant la concentration et la transmission des données vers les plateformes dédiées. Les sondes sont placées verticalement, avec leur capteur trempant dans l'eau du canal. Une plaque de plexiglass avec un support en plastique imprimé permet de maintenir les sondes correctement et de fermer le canal tout en laissant la possibilité d'observer l'intérieur par le dessus. La figure 32 est une photographie de cette installation. Habituellement, les différentes variables mesurées dans ces stations de mesure sont la température de l'eau, son pH, sa conductivité électrique et sa turbidité (N. Walcker et al., 2018).



Figure 32 : Canal de dérivation d'une station OTHU (1er juillet 2021)

La sonde de turbidité, visible à la figure 34, a donc été placée dans ce canal, à la suite des deux autres sondes de turbidité professionnelles déjà présentes. Deux sondes de turbidité sont utilisées en permanence afin de s'assurer de la validité des résultats du fait de la variabilité de la mesure de turbidité, plus importante que pour les autres paramètres mesurés.



**Figure 33 : Boîtier d'enregistrement installé dans le bungalow (1er juillet 2021)**



**Figure 34 : Sonde de turbidité installée dans le canal (1er juillet 2021)**

Notre sonde étant autonome, le système d'acquisition du bungalow n'est pas utilisé. A la place, la sonde est reliée à son boîtier d'acquisition présenté plus haut et visible à la figure 33. L'alimentation en énergie est assurée par un panneau solaire disposé sur le toit du bungalow et une antenne LoRa déjà installée sur la station de mesure assure le transfert des données jusqu'à la plateforme TTN en plus de leur enregistrement sur carte SD.

Cette installation a été retirée après une dizaine de jours d'acquisitions. En effet, comme présenté au chapitre suivant, l'acquisition de notre sonde montre des variations cycliques de la turbidité là où le matériel professionnel n'en montre pas lorsque le canal est mis en eau. Parmi les causes possibles de ce phénomène, la pompe du canal semble être la principale. Lors de son fonctionnement, la pompe produit un champ électromagnétique capable de créer des phénomènes d'induction. Bien que la majorité du câble utilisé sur notre prototype soit du câble d'instrumentation sensé éviter ces parasitages, certaines zones en sont dépourvues et aucune modification facile à mettre en place sur la sonde ne permet de supprimer cet effet. Des phénomènes similaires ont été reportés par le personnel de l'OTHU sur leurs anciennes installations qu'ils ont réussi à supprimer par la réfection de leur installation électrique.

Sans pouvoir s'assurer de leur origine mais supposant que les perturbations observées sont dues au milieu extérieur et non à la sonde ou à l'écoulement, la sonde a ensuite été installée dans une des canalisations d'entrée du bassin de rétention.

### **3.4.3 Installation sur la canne de mesure de la hauteur d'eau dans la canalisation du bassin de rétention**

L'installation sur la canne de mesure de la hauteur d'eau est principalement motivée par sa facilité d'installation, son éloignement de perturbations électromagnétiques et sa position au

centre de l'écoulement. Pour cela, la sonde est simplement fixée au moyen de colliers à la canne (figure 35). Cette canne s'élève lorsque le niveau de l'eau monte mais son extrémité où est accrochée la sonde est immergée lors des pluies. Cette installation a toutefois posé des problèmes pour deux raisons. La première raison est que la sonde étant creuse, elle jouait le rôle de flotteur sur la canne et perturbait alors les mesures de hauteurs d'eau utiles à l'activation des pompes des bungalows présents sur le site. Une tentative de lestage a été faite sans pouvoir résoudre correctement le problème. La seconde est que les valeurs obtenues étaient très bruitées du fait de l'oscillation de la canne lors des mesures. Pour ces raisons, cette installation a été abandonnée au profit d'une fixation sur la paroi de la canalisation.



**Figure 35 : Installation de la sonde sur la canne de mesure de la hauteur d'eau**

#### **3.4.4 Première installation sur la paroi de la canalisation d'arrivée du bassin de rétention**

L'installation de la sonde dans la canalisation en amont du bassin de rétention a pour objectif principal d'être éloignée de toute perturbation électromagnétique tout en mesurant directement dans l'écoulement. La sonde est installée dans un renforcement dans la paroi, visible sur la figure 36, à une quinzaine de mètres en amont de la sortie de la canalisation. Ce positionnement est motivé par la facilité d'installation de la sonde à cet endroit du fait de la paroi verticale et plane et par la relative protection face aux possibles objets charriés par l'écoulement qui pourraient se déposer sur le capteur de la sonde.





**Figure 36 : Installation de la sonde de turbidité dans un renforcement de la canalisation (16 juillet 2021)**

Toutefois, un dépôt progressif de sédiments a été observé dans le renforcement, pouvant fausser les mesures en indiquant une turbidité plus importante que celle réellement présente. La sonde a donc été déplacée une seconde fois pour être installée directement dans l'écoulement.

### **3.4.5 Seconde installation sur la paroi la canalisation d'arrivée du bassin de rétention**

La sonde de turbidité est finalement installée directement dans l'axe de l'écoulement, la tête tournée vers l'aval à environ trois mètres de la sortie de la canalisation. Cette position doit permettre une mise en eau rapide de la sonde par temps pluvieux et éviter toute accumulation de sédiments. Un tissu métallique recouvre la sonde dans l'optique d'améliorer l'évacuation d'éventuels éléments charriés par l'écoulement. Cette position près de la sortie de la canalisation permet aussi de confronter la sonde à un éclairage naturel partiel et de s'assurer du bon fonctionnement du dispositif visant à annuler l'influence des infrarouges émis par le soleil. Comme pour l'installation précédente, le boîtier d'acquisition est installé dans le trou lumineux visible sur la figure 37 tout en haut de l'image. La perche accrochée à proximité de ce trou appartient à un système de mesure du niveau d'eau indépendant de la sonde de turbidité.



**Figure 37 : Installation de la sonde dans l'écoulement (26 juillet 2021)**

## 4. Résultats et discussion

La sonde de turbidité a été testée en laboratoire et sur le terrain. Tandis que les tests en laboratoire servent à confirmer le bon fonctionnement global de la sonde, ceux sur le terrain s'intéressent à la qualité de la mesure.

### 4.1 Résultats en laboratoire

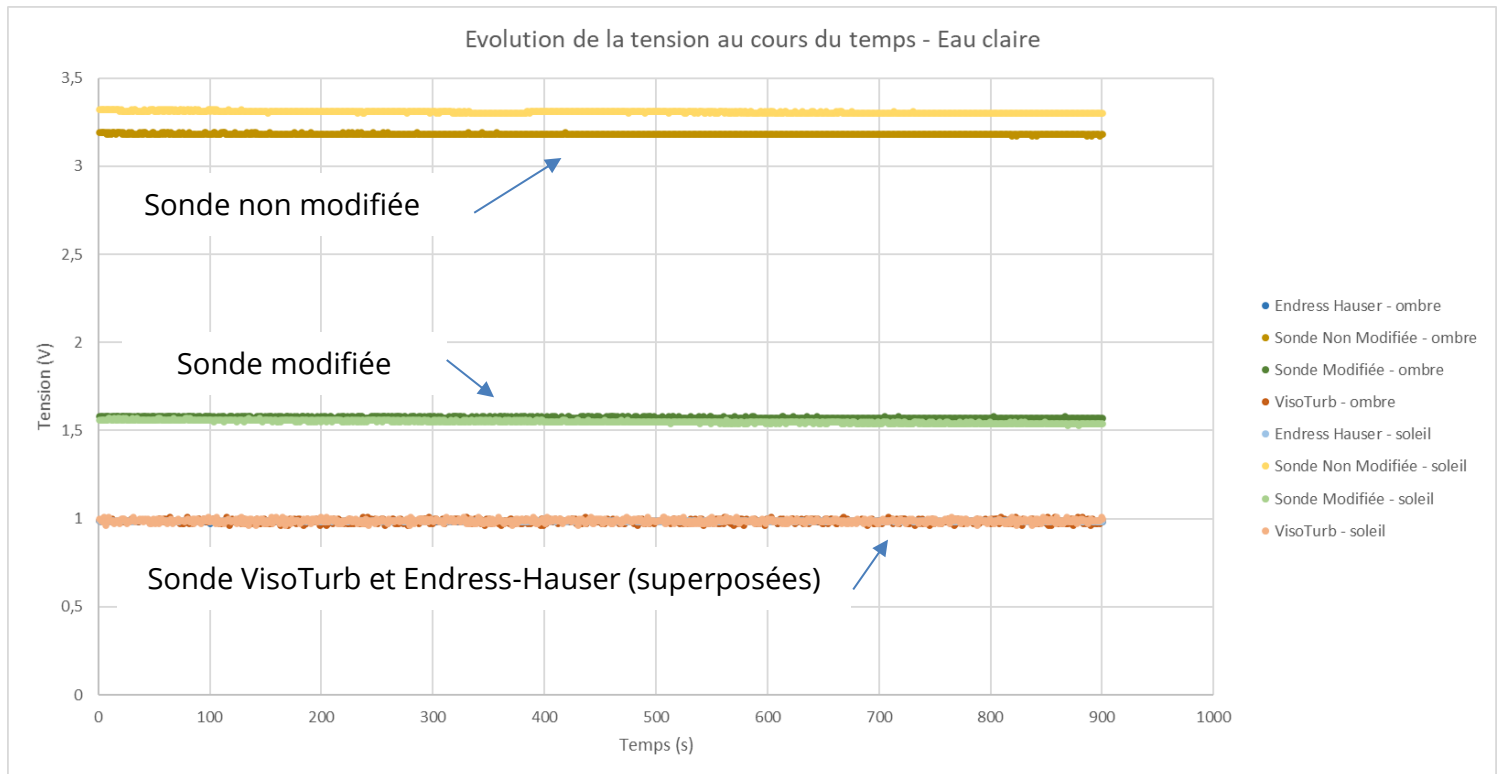
#### 4.1.1 Modification des LED et de l'alimentation du capteur de turbidité

Le premier test effectué consiste à s'assurer de l'efficacité des modifications apportées au capteur de turbidité comme mentionnées au chapitre 3. Pour ce test, les mesures sont effectuées dans de l'eau claire du robinet. Du fait des normes encadrant la qualité de l'eau potable, cette eau est extrêmement peu turbide avec une turbidité inférieure à 1 NTU. Se placer dans cette situation extrême permet de confronter les sondes à une situation où le rayonnement solaire pouvant perturber la mesure est maximum. Pour comparer les mesures, une première série de mesure est effectuée à l'ombre puis une seconde en plein soleil. La comparaison des résultats pour chaque sonde permet alors de voir l'influence du soleil sur la mesure. Quatre sondes ont été utilisées pour ce test : une sonde bas-coût avec le capteur non modifié, une avec le capteur modifié, une sonde WTW VisoTurb et une sonde Endress-Hauser.

Les résultats de ce premier test sont visibles à la figure 38. Les résultats pour les sondes Endress-Hauser (courbes bleues) et WTW VisoTurb (courbes rouges) sont superposées et tournent autour de 1 V. Cela est dû à l'utilisation de la sortie 4 – 20 mA pour l'acquisition des données. Cette sortie transmet un signal en intensité proportionnel à la valeur de turbidité mesurée. Une résistance de 250  $\Omega$  permet d'obtenir une tension par la loi d'Ohm. L'eau ayant une turbidité proche de 0 NTU, les sondes renvoient une intensité minimale de 4 mA, correspondant alors à une tension de 1V. Les signaux sont assez stables dans le temps. Les écarts relatifs entre les mesures au soleil et à l'ombre sont en moyenne de 0,56 % pour la sonde Endress-Hauser et de 1,4 % pour la WTW VisoTurb.

Les résultats pour la sonde modifiée sont représentés par les courbes vertes. On constate que les deux courbes sont presque superposées, ce qui indique que l'écart entre les mesures au soleil et à l'ombre est ténue. L'écart relatif est de 1,2 %, ce qui est en accord avec celui des sondes professionnelles. La sonde est ici alimentée en 5 V par une carte Arduino Uno et la résistance du potentiomètre est laissée à sa valeur d'origine soit 1 k $\Omega$  environ. Dans ces conditions, la tension maximale obtainable est d'environ 1,55 V. Pour des solutions plus turbides, les tensions obtenues seront moindres puisque la mesure se fait par atténuation. Au contraire des sondes professionnelles qui mesurent elles par néphélométrie et d'autres angles, pour lesquelles la tension de 1 V est la tension minimale et la mesure dans des solutions plus turbide entraînera une augmentation de la tension mesurée.

Pour la sonde bas-coût non modifiées, les résultats sont représentés par les courbes jaunes. On constate un écart plus important entre les mesures au soleil et à l'ombre. Ce premier test semble donc indiquer la pertinence de la modification pour réduire l'impact du soleil sur la mesure. L'écart relatif moyen est le plus important des quatre sondes avec 3,8 %.

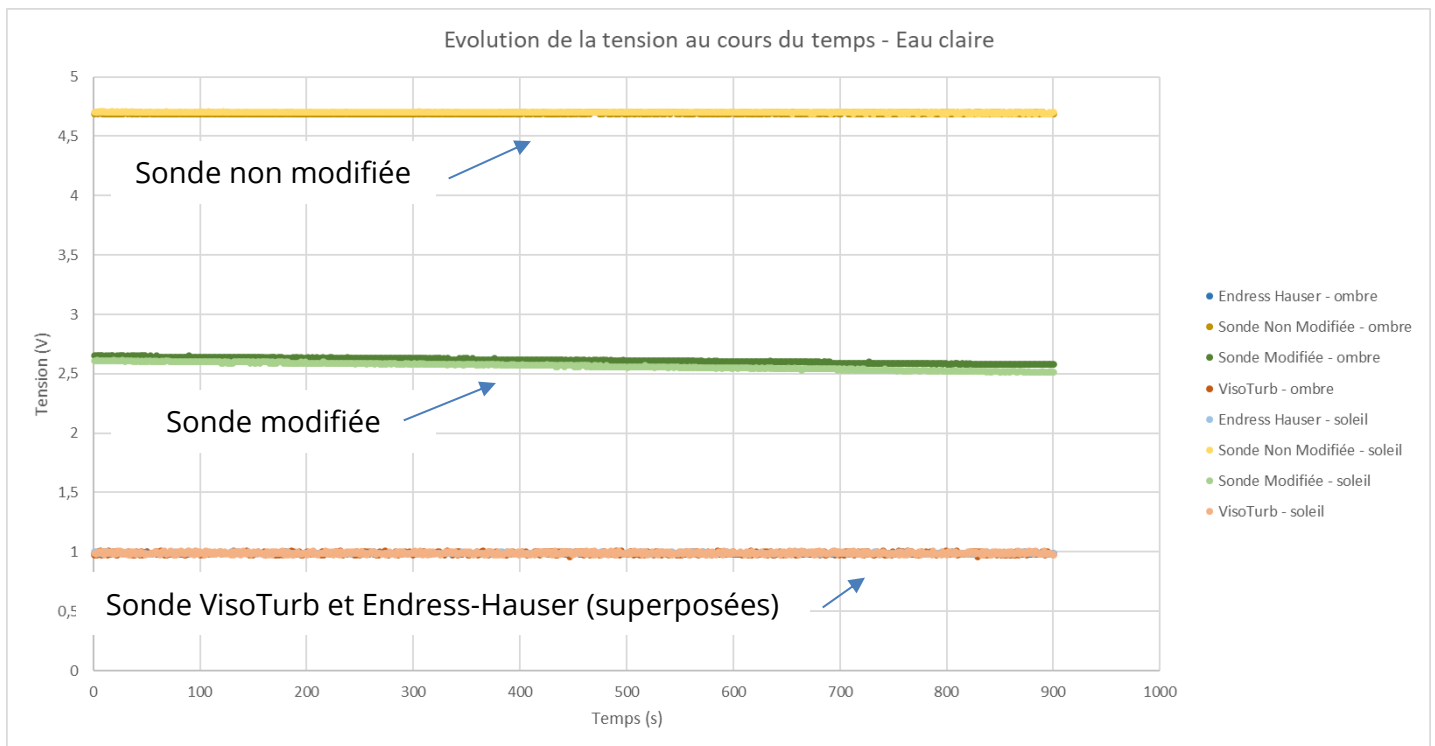


**Figure 38 : Tension de sortie des différentes sondes de turbidité à l'ombre et au soleil – R = 1 k $\Omega$**

Cependant, le changement de LED a entraîné une diminution de la plage de mesure possible. En effet, pour une même tension d'alimentation de 5 V et une résistance au potentiomètre de 1 k $\Omega$ , la tension de sortie de la sonde modifiée est deux fois plus importante que celle de la sonde non modifiée. Cela peut avoir un impact sur la précision des mesures puisque la carte Arduino Uno permet l'acquisition sur une plage de 0 à 5 V sur 10 bits. Ainsi quand la plage de mesure est entièrement utilisée, la tension mesurée peut prendre 1024 valeurs. Dans le cas actuel de la sonde modifiée, la tension maximale de 1,55 V ne laisse une plage de mesure que de 320 valeurs environ. La précision obtenue s'en trouve donc amoindrie.

Pour pallier ce problème, il est possible de modifier la résistance du potentiomètre, afin d'influer sur l'intensité lumineuse de la LED émettrice, ce qui conduit à une augmentation de la tension du signal de sortie et donc à une augmentation de la plage de mesure. Il faut cependant prendre en considération de possibles saturations comme pour la sonde non modifiée à la figure 39.

Un test identique à celui décrit précédemment a été réalisé mais avec un potentiomètre réglé sur une résistance de 500  $\Omega$ . Les tensions mesurées sont alors supérieures pour les deux sondes bas-coût qu'avec la résistance de 1 k $\Omega$  mais la sonde non modifiée atteint sa valeur de saturation. L'intensité lumineuse perçue par la LED réceptrice est trop importante et renvoie la tension maximale possible. La valeur de la résistance doit donc être choisie pour éviter ce cas de figure. Les écarts relatifs aux mesures à l'ombre sont de l'ordre de 1 % en moyenne pour les quatre sondes.



**Figure 39 : Tension de sortie des différentes sondes de turbidité à l'ombre et au soleil – R = 500 Ω**

Différentes acquisitions pour des solutions de différentes concentrations ont été réalisées dans la configuration initiale du capteur, avec la résistance de 1 kΩ. Parmi celles-ci, l'acquisition réalisée pour une solution très chargée, avec 10 g/l de sédiments montre des limites dans le protocole utilisé et dans les résultats de la sonde VisoTurb. La solution initialement brassée et supposée homogène décante pendant quinze minutes, ce qui fait varier progressivement la turbidité à l'endroit de la mesure. Comme précédemment, une mesure au soleil est précédée d'une mesure à l'ombre.

On constate que les courbes correspondant à la sonde VisoTurb (courbes rouges à la figure 40), n'ont pas une évolution cohérente avec ce qui serait attendu. En effet, cette sonde mesurant par néphélométrie, la tension affichée devrait diminuer progressivement avec la diminution de la turbidité. Au contraire, on observe ici une augmentation de la tension de sortie. Ceci s'exprime par le fait que cette sonde étant prévue pour la mesure dans des eaux peu chargées en MES ; elle n'est pas adaptée à cette concentration. Les valeurs de tensions renvoyées sont donc sous estimées. La sonde ne sature pas comme c'est le cas pour la sonde Endress-Hauser (courbes bleues) pour laquelle la turbidité initiale dépasse sa plage de mesure et entre en saturation jusqu'à ce que la turbidité passe sous les 8000 NTU.

L'évolution des courbes des sondes bas-coûts sont en accord avec ce qui peut être attendu. Plus la turbidité diminue, plus la tension augmente. On constate un écart croissant dans le temps dans l'évolution des courbes entre les mesures à l'ombre et au soleil. Cet écart peut en partie trouver son explication dans des conditions initiales légèrement différentes entre les deux acquisitions. Il est difficile d'homogénéiser une solution aussi chargée et bien qu'à l'œil, les solutions peuvent sembler correctement brassées, une partie des sédiments peut rester en dépôt. L'observation de l'évolution de l'écart relatif (figure 41) montre en effet des écarts élevés diminuant progressivement avant de réaugmenter après 3 minutes d'acquisition.



Les deux sondes professionnelles sont moins impactées ; leurs écarts relatifs restent assez stables tout au long de l'acquisition. La sonde non modifiée reste celle avec l'écart le plus important entre les acquisitions.

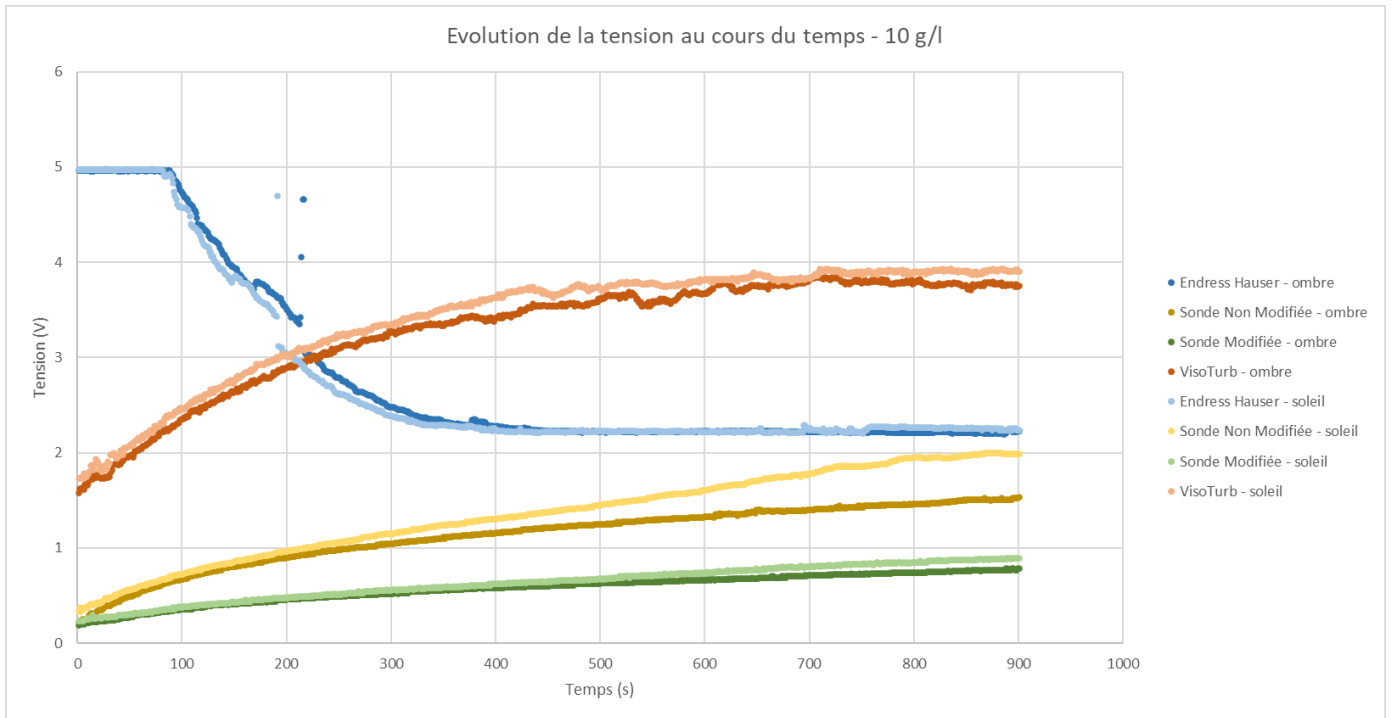


Figure 40 : Tension de sortie des différentes sondes de turbidité - R = 1 kΩ - Eau chargée à 10 g/l

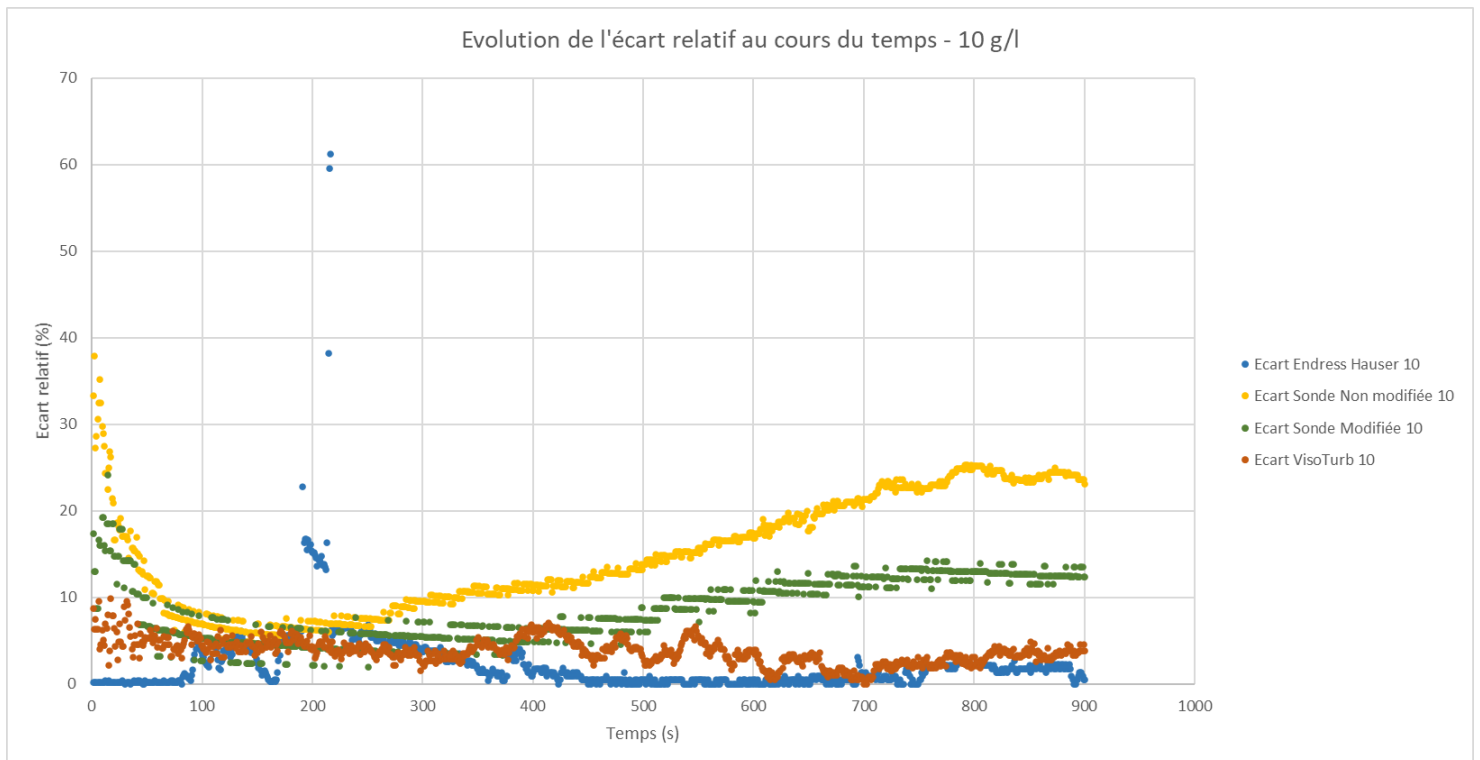


Figure 41 : Evolution des écarts relatifs des quatre sondes dans le temps - Eau chargée à 10 g/l

À la suite de ces différents tests, les modifications apportées au capteur de turbidité initial ont été jugées satisfaisantes et apportant une amélioration dans la précision de la mesure.

Alors que les premiers tests étaient réalisés avec une carte Arduino Uno fonctionnant en 5 V, le modèle final utilise une carte Arduino MKR Wan fonctionnant en 3,3 V nécessaire à l'utilisation du LoRa. Cette tension est une spécificité de cette carte et nécessite donc de trouver la valeur de résistance offrant une plage de mesure suffisante.

Différentes valeurs de résistances ont été testées et présentées à la figure 42. Ces mesures ont été effectuées en étant exposées au soleil avec des solutions brassées en permanence.

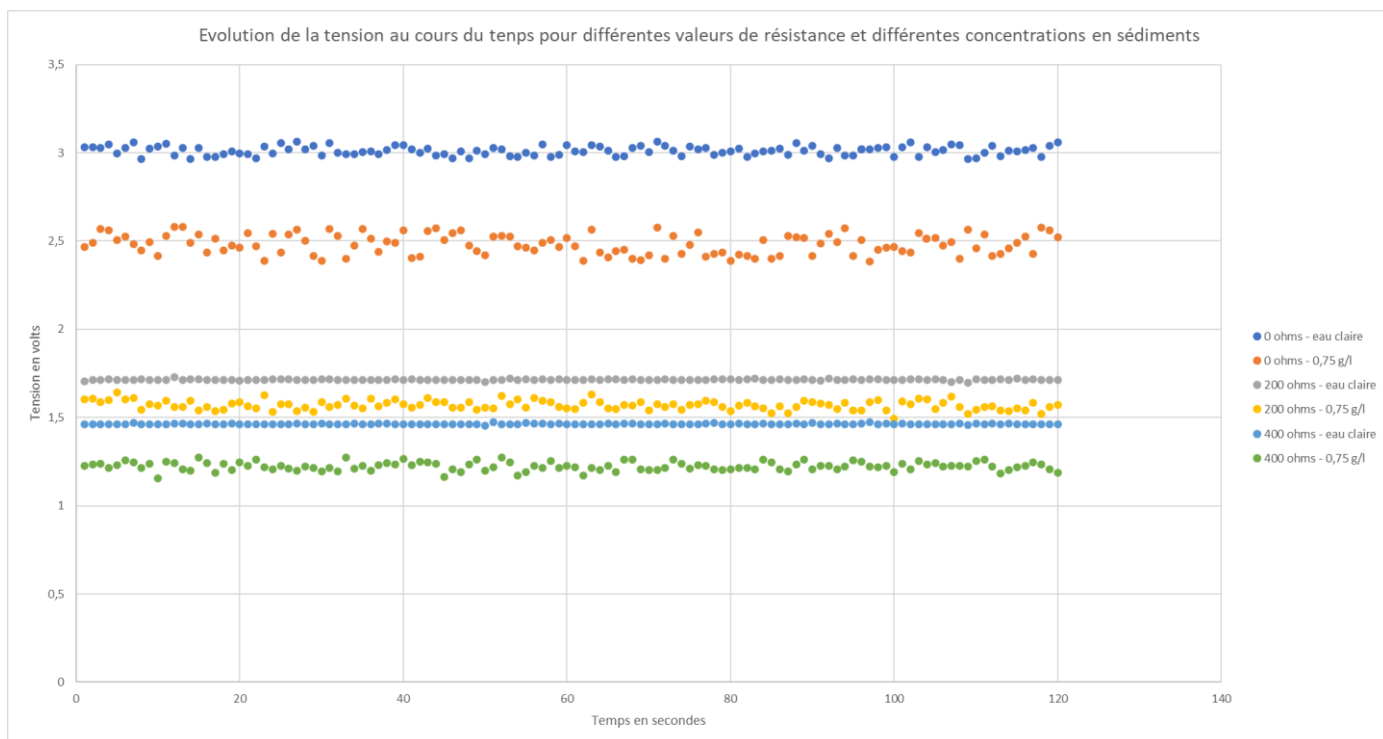


Figure 42 : Tension de sortie de la sonde de turbidité pour différentes valeurs de résistance en eau claire et à 0,75 g/l

On peut voir que les résultats obtenus pour une résistance de 0  $\Omega$  sont plus bruités et trop proches de la tension de saturation pour pouvoir retenir cette valeur. Une résistance fixe de 470  $\Omega$  est branchée en série du potentiomètre, ce qui exclut un possible usage de la LED dans une zone de non-linéarité.

La valeur de 200  $\Omega$  présente elle un signal satisfaisant en termes de stabilité pour une plage de mesure d'environ 55 % de la plage totale disponible. Cette valeur a donc été retenue. Une valeur intermédiaire de 100  $\Omega$  a aussi été testée bien que non représentée sur la figure 42 car non enregistrée et présentait un signal bruité similaire à celui obtenu pour 0  $\Omega$ .

### 4.1.2 Test du capteur sur plusieurs jours

Pour tester l'efficacité de la sonde à mesurer sur le long terme, un test en laboratoire a été effectué en utilisant une solution chargée à 10 g/l brassée puis laissée décanter. Les données sont acquises comme dans la version finale, soit des temps d'une minute d'acquisition entrecoupés de huit minutes de veille. La solution a décanté pendant près de 20 heures puis a été de nouveau brassée pour voir la réaction du système face à un changement brutal de la turbidité. Un second brassage a ensuite été réalisé puis la solution a décanté pendant plus de deux jours. Le graphique à la figure 43 représente cette évolution. Les tensions minimales, médianes et maximales mesurées pour chaque minute d'acquisition y sont représentées. Globalement, le signal est assez peu bruité. Les trois phases de décantation sont identifiables et les écarts entre les valeurs maximales et minimales sont assez restreints.

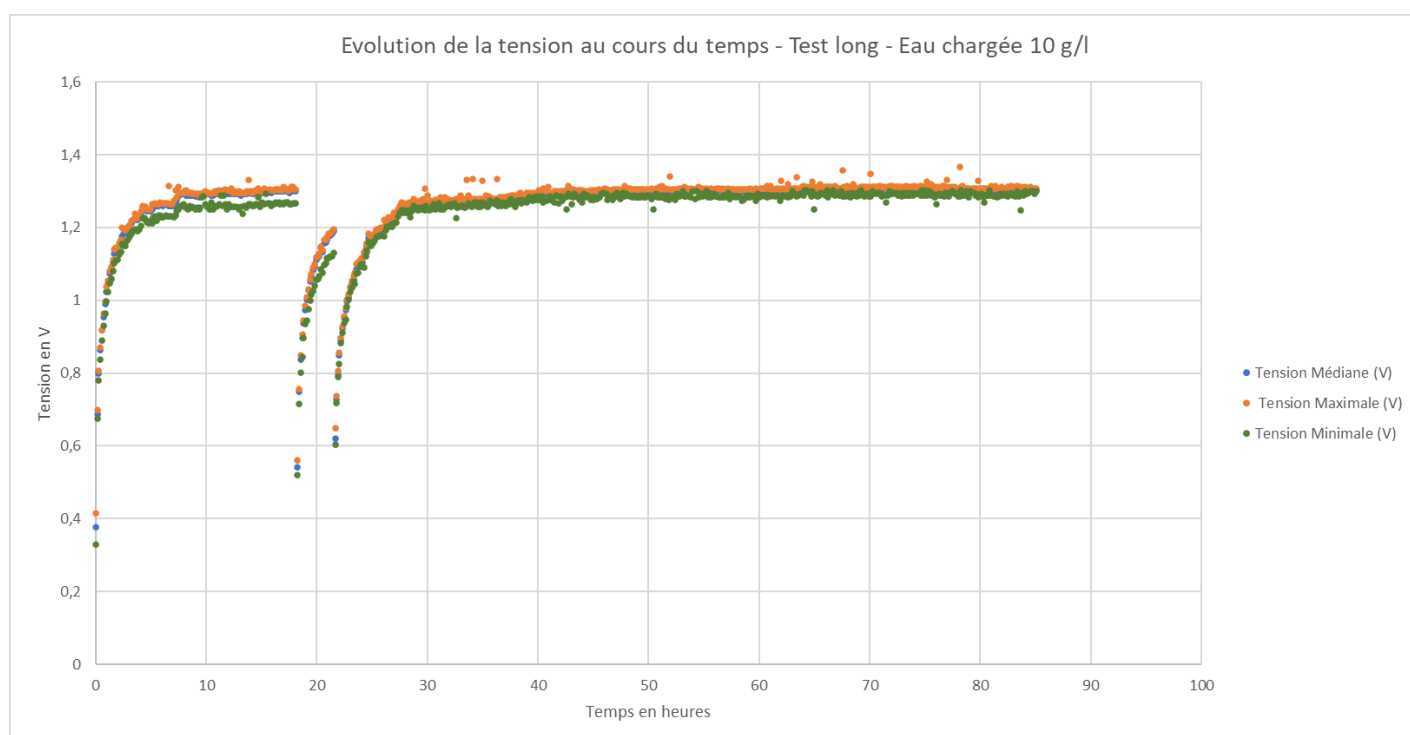


Figure 43 : Evolution de la tension de sortie au cours du temps pour une solution chargée à 10 g/l

L'évolution de la tension de la batterie a aussi été enregistrée pendant toute la durée de l'acquisition. Le système n'étant alimenté que par sa batterie dans autre moyen de charge, cela permet de tester sa consommation et de s'assurer que la batterie a des capacités suffisantes pour alimenter le système en autonomie sur une longue période. La courbe à la figure 44 montre une évolution décroissante dans le temps d'environ 0,002 V/h par régression linéaire. Cela laisse une autonomie de quelques centaines d'heures avant que la batterie ne soit trop déchargée pour alimenter correctement le système, ce qui est amplement suffisant dans notre utilisation où les absences de charge n'excèdent pas quelques heures.

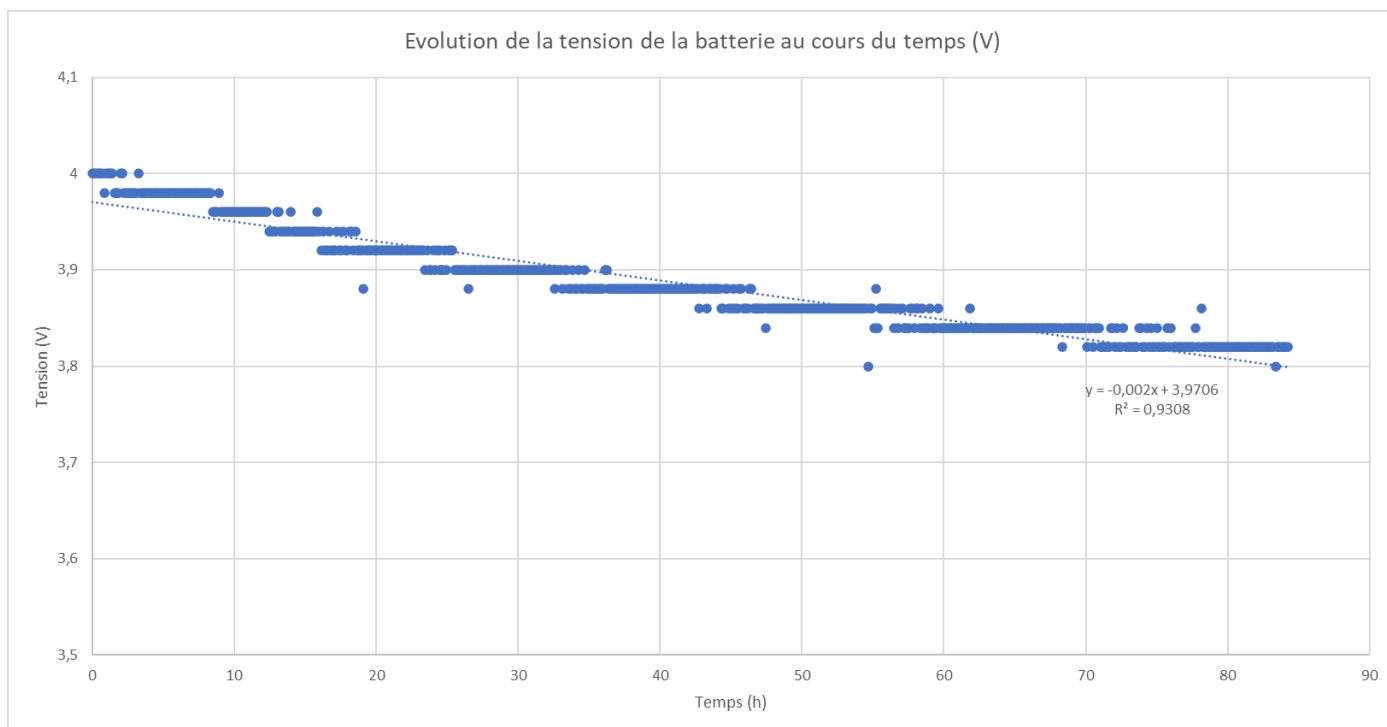


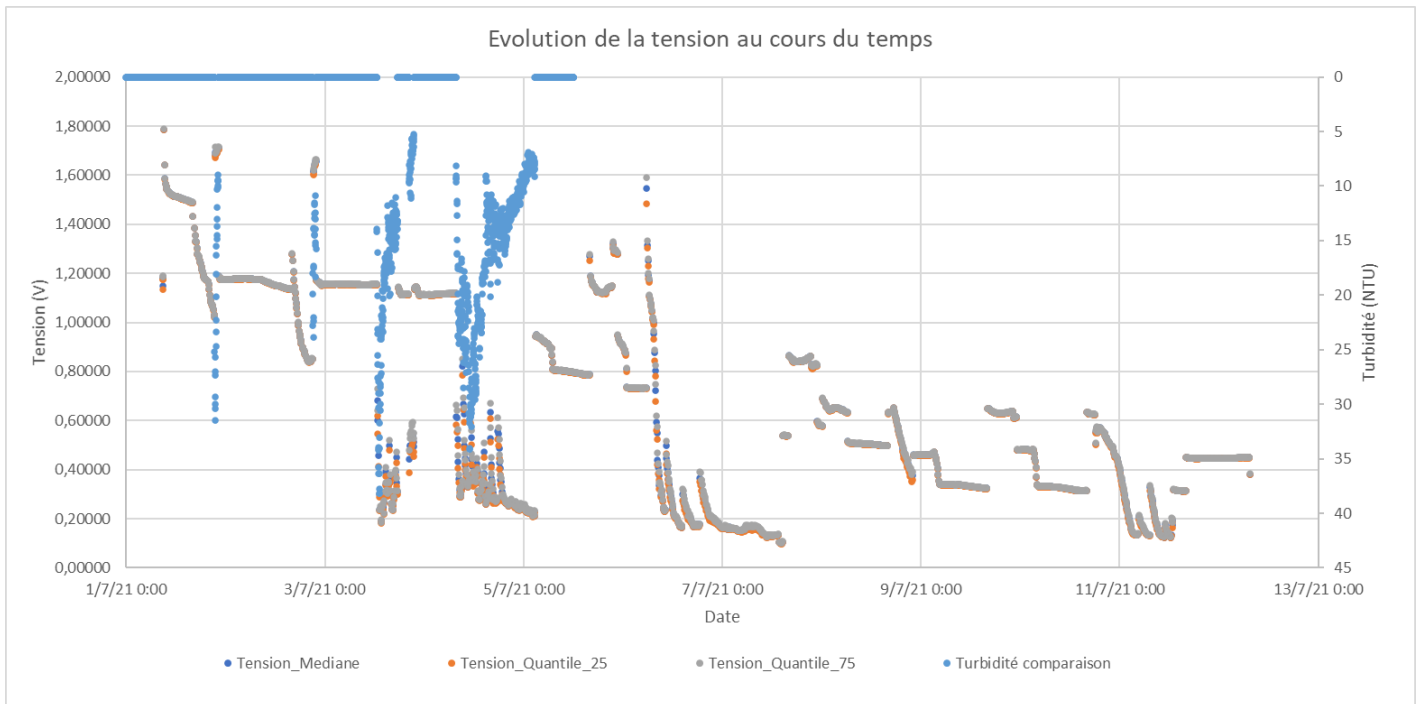
Figure 44 : Evolution de la tension de la batterie au cours du temps

Ces tests en laboratoire ayant montré des résultats satisfaisants, la sonde a été installée sur le site Django Reinhardt, bassin de rétention et d'infiltration de Chassieu.

## 4.2 Résultats du site d'étude de Chassieu

### 4.2.1 Résultats du bungalow d'infiltration

Les chroniques obtenues pour l'installation dans le bungalow d'infiltration montrent un signal stable en ce qui concerne les acquisitions sur une minute. En effet, la figure 45 représente les valeurs médianes ainsi que le premier et le troisième quartile des tensions mesurées. On peut voir que les écarts entre ces valeurs restent assez faibles et ce même lors de la mise en eau du canal. On constate également que l'évolution de la turbidité mesurée par la sonde bas-coût est en accord avec celle mesurée par la sonde professionnelle installée dans le bungalow, disponible pour la première moitié de l'acquisition (figure 45) Cependant, des variations cycliques de la turbidité sont observables et ce uniquement lors des phases de pluie. La périodicité de ces cycles peut varier de trente minutes à près d'une heure et demie. Ce phénomène n'ayant pas été mis en évidence au laboratoire, des causes possibles ont été recherchées et parmi elles, la possibilité d'une influence électromagnétique de la pompe alimentant le canal en eau, située sous celui-ci et donc à proximité de la sonde semble la plus probable. Ce type de pompe contient des bobines et des aimants capables de produire des champs électromagnétiques pouvant créer des courants induits dans des circuits électriques à proximité. La sonde n'étant pas totalement protégée contre ce phénomène, il a été décidé de la déplacer en extérieur.



**Figure 45 : Evolution de la turbidité mesurée dans le bungalow d'infiltration**

Un phénomène de fouling peut aussi être observé, notamment lors des phases où le canal est à sec. Une chute progressive de la tension entre chaque épisode pluvieux est en effet visible et est due au dépôt de matière organique et de sédiments sur la sonde. Le fouling est assez important dans le canal puisqu'en une semaine de mesures, la sonde a perdu plus d'un volt dans sa tension de sortie. L'amplitude du signal s'en trouve alors réduite. Un nettoyage régulier est donc nécessaire dans cet environnement. L'encrassement de la sonde est visible figure 46.



**Figure 46 : Encrassement de la sonde après dix jours de fonctionnement**

## 4.2.2 Résultats de l'installation sur le flotteur

La sonde a ensuite été installée dans la canalisation d'arrivée du bassin de rétention, sur la canne servant à mesurer le niveau d'eau à l'intérieur. Cette installation n'a été conservée que quelques jours car la sonde étant creuse, elle agissait comme un flotteur et perturbait le bon fonctionnement de la canne. Une tentative de lestage de la sonde pour compenser la poussée d'Archimède a été faite mais ne s'est pas avérée efficace. Elle a donc été déplacée plus en amont dans la canalisation. Les données mesurées sur cette installation (figure 47) ne sont pas pertinentes, une grande variabilité a été observée lors des événements pluvieux et peut s'expliquer par des oscillations provoquées par la flottaison de la sonde sur la canne. Les événements pluvieux sont bien identifiables et sont en accord avec les variations de turbidité de la sonde professionnelle mais aucune information sur la turbidité ne peut être mise en avant. Cette acquisition des différentes valeurs statistiques est un avantage pour la détection de dysfonctionnement en comparaison des sondes professionnelles qui ne transmettent en général qu'une unique valeur moyenne.

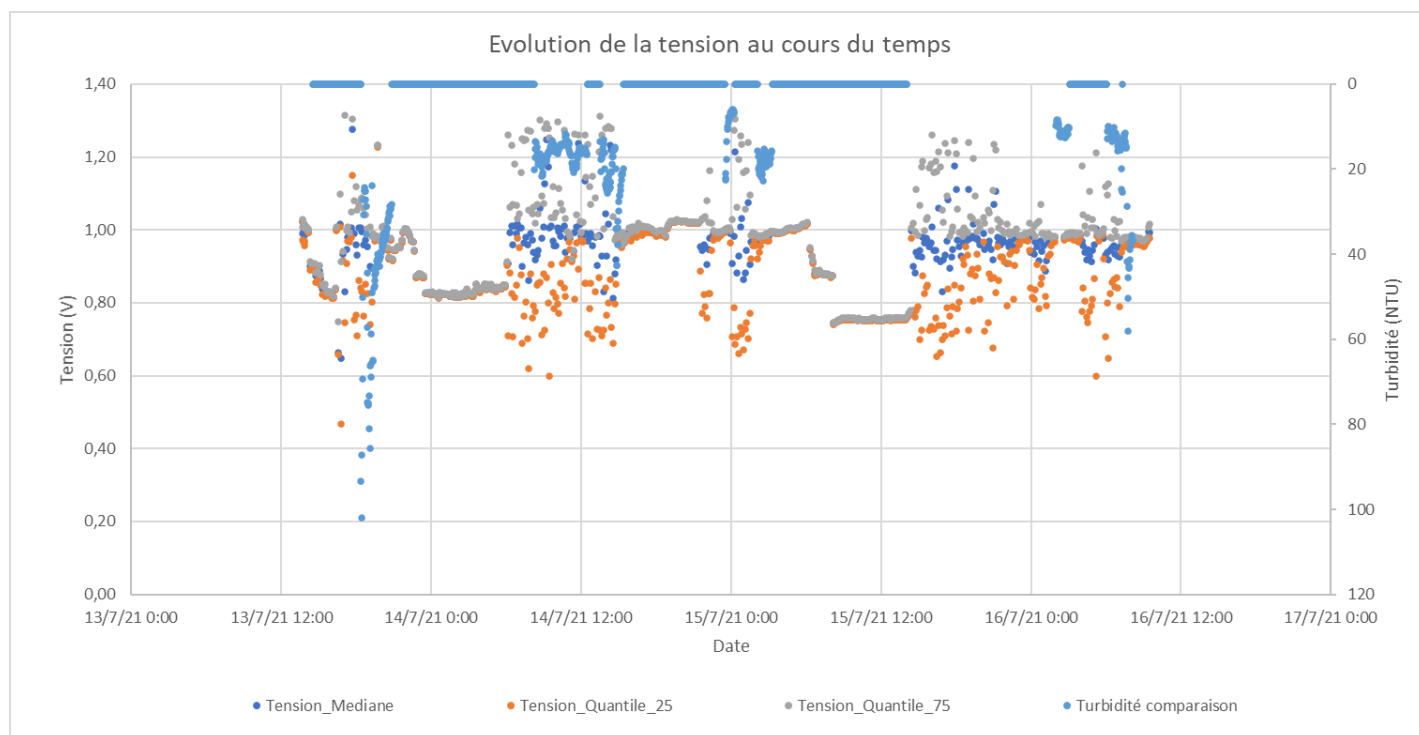
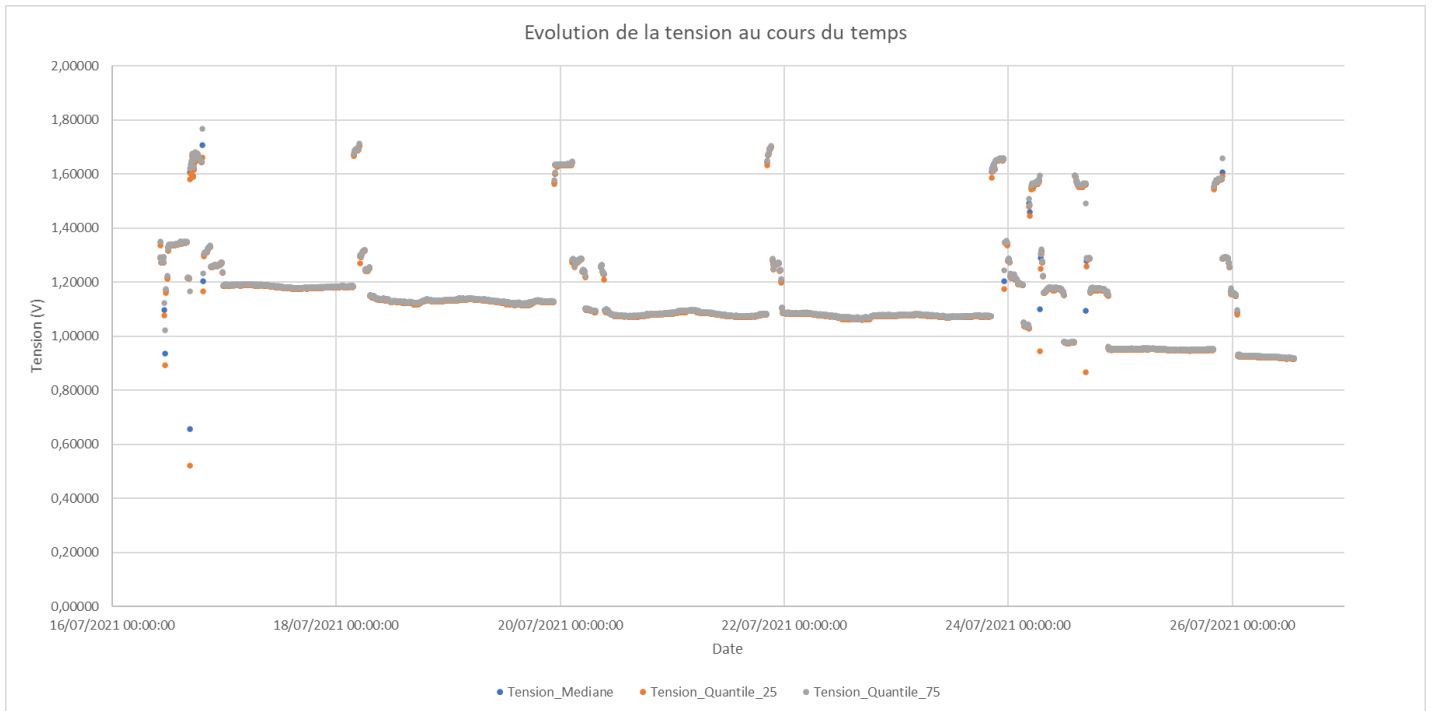


Figure 47 : Evolution de la turbidité mesurée par l'installation sur la canne de mesure de hauteur d'eau

## 4.2.3 Résultats de la première installation sur la paroi de la canalisation

Dans cette installation, la sonde est fixée sur une paroi verticale, dans un léger renforcement de la paroi. Les événements pluvieux se démarquent des phases sèches par une augmentation soudaine de la turbidité suivie d'une baisse toute aussi brutale avant un retour à la tension de temps sec (figure 48). La tension de temps sec est inférieure à celle où la sonde est immergée car la sonde ne réagit pas de la même manière dans l'eau et dans l'air. Il a en effet été constaté que dans un environnement peu éclairé, les valeurs mesurées par la sonde dans l'air étaient inférieures à celles obtenues dans une eau claire. Au contraire, si la sonde mesure dans l'air et est fortement exposée au soleil, les mesures obtenues sont très supérieures à ce qui est attendu pour une mesure dans l'eau en plein soleil. Ce comportement n'a été vraiment

remarqué qu'avec ces résultats. Au laboratoire, les acquisitions n'étaient lancées exclusivement qu'avec la sonde déjà plongée dans l'eau. Ces différences de mesure selon le milieu n'ont donc été constaté qu'à ce moment.



**Figure 48 : Evolution de la turbidité mesurée par la première installation sur la paroi de la canalisation**

La figure 49 représente un zoom sur l'événement pluvieux du 16 juillet 2021, représentatif de l'évolution de la turbidité en cas de pluie observée par la sonde. Aux données de turbidité est ajoutée la hauteur d'eau dans la canalisation mesurée au moyen d'une autre sonde. L'axe représentant la turbidité est inversé pour que sa dynamique soit plus facilement comparable à la dynamique de la hauteur d'eau. Un pic de turbidité est observable lors de l'élévation du niveau de l'eau dans la canalisation. Puis la turbidité diminue fortement en même temps que le niveau de l'eau descend. La turbidité réaugmente quand le niveau de l'eau passe sous une hauteur de 5 cm. Cette hauteur semble la valeur limite pour laquelle la sonde est immergée. La diminution de la turbidité s'explique par une accumulation de sédiments à l'endroit de la sonde. La valeur de la turbidité retrouve une valeur assez stable une fois l'écoulement revenu à un niveau faible.

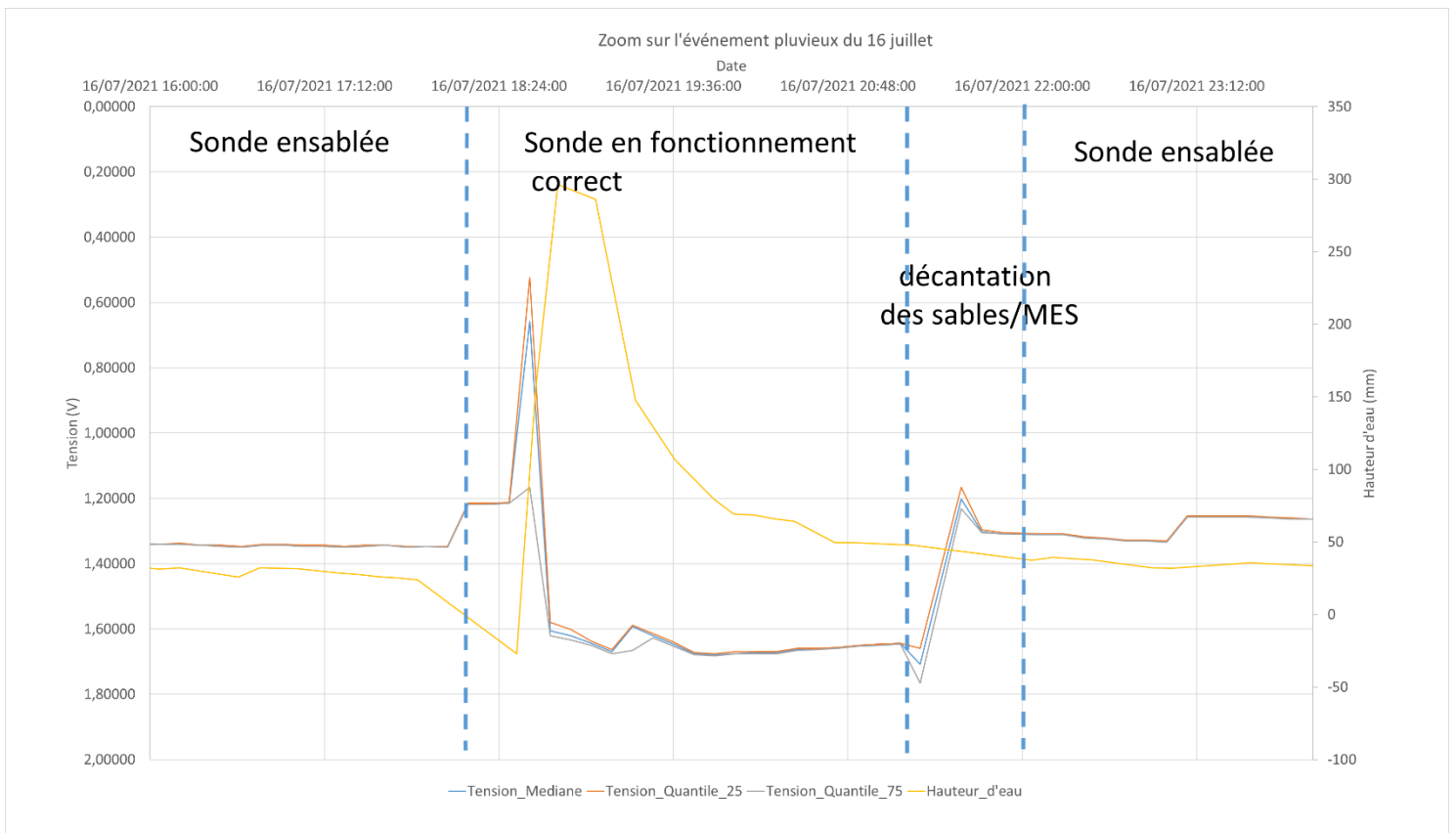


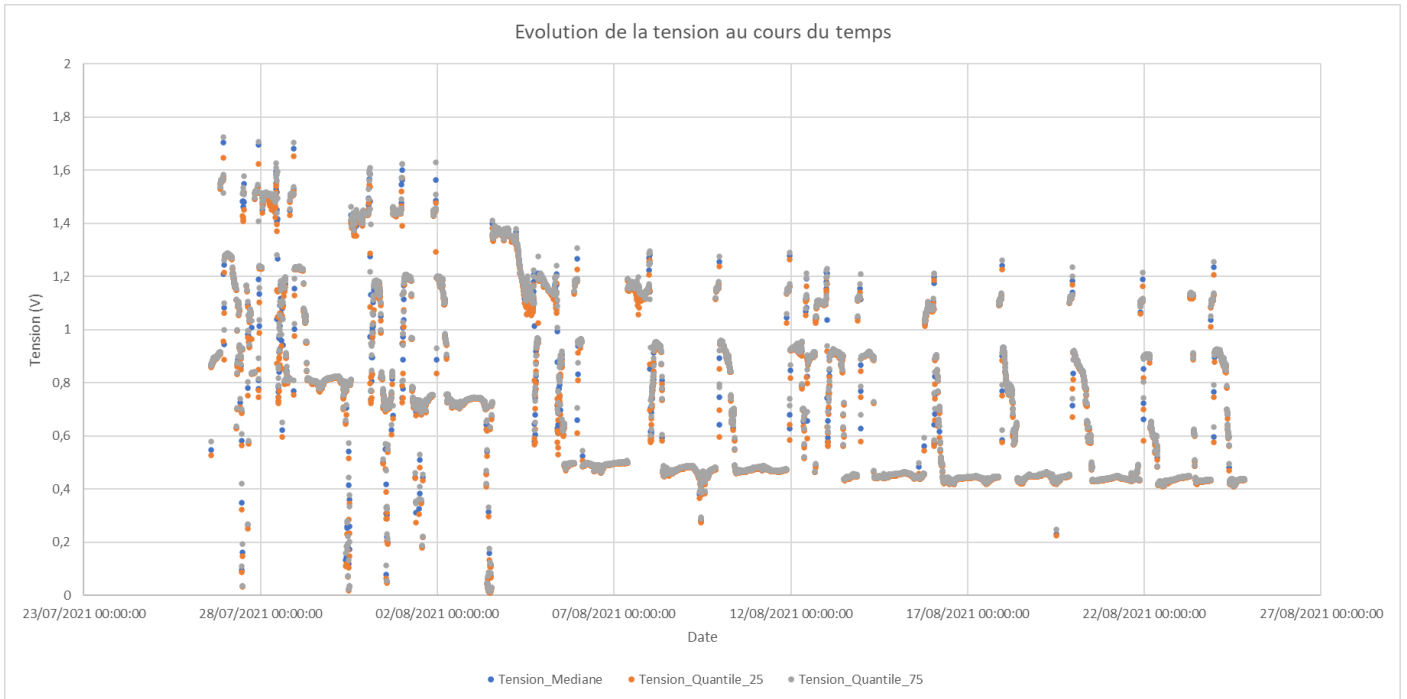
Figure 49 : Zoom sur l'événement pluvieux du 16 juillet 2021

#### 4.2.4 Résultats de la seconde installation sur la paroi de la canalisation

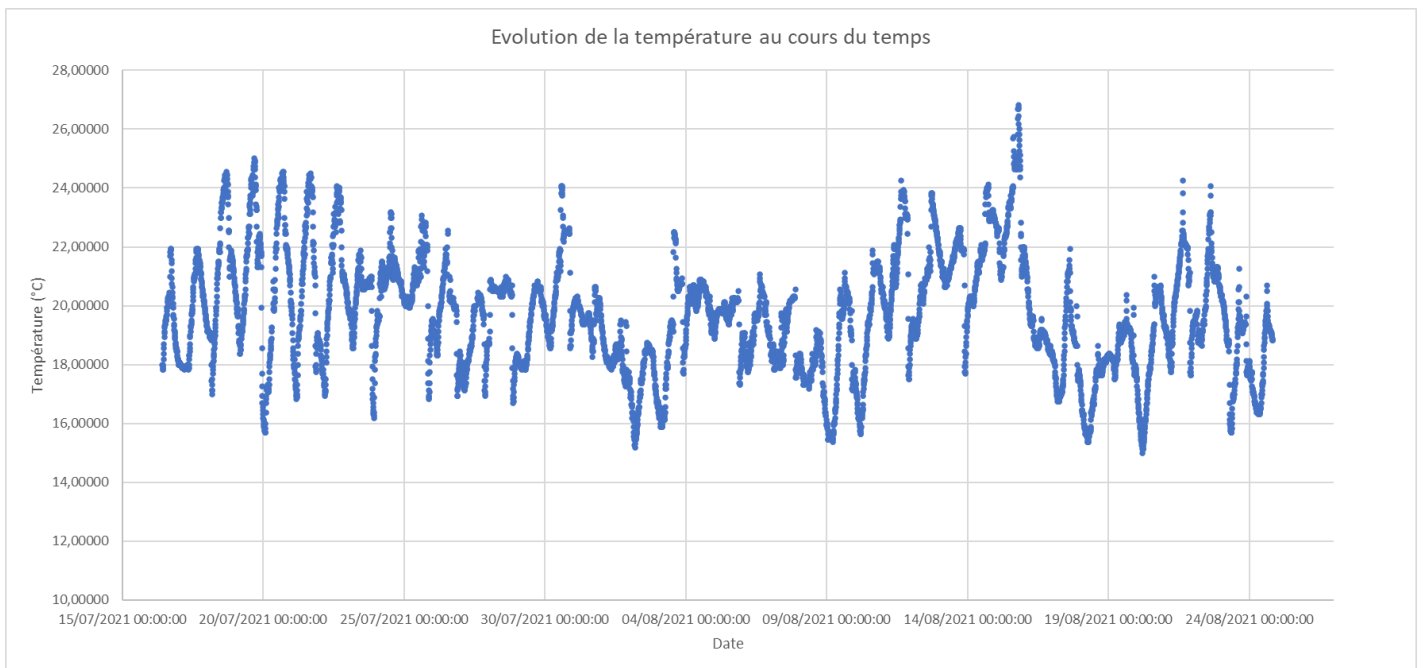
Cette installation pour laquelle la sonde est fixée à l'horizontal, dans le sens du flux, est celle qui a duré le plus longtemps, principalement pour causes d'emploi du temps empêchant l'accès au site. L'évolution des valeurs acquises est sensiblement similaire à celle obtenue pour la première installation dans la canalisation. La tension est supérieure pour les événements pluvieux à celle de temps sec et se caractérise par le pic soudain suivi d'une baisse progressive dans le temps (figure 50). Un fouling progressif est constatable sur les deux premières semaines d'acquisition puis la valeur se stabilise autour de 0,43 V. L'amplitude des pics de turbidité reste toutefois constante dans le temps. Une compensation du fouling peut donc être envisagée.

Le capteur de température fonctionne correctement. Sur cette période d'acquisition, la température de l'eau a varié entre 15 et 27 °C (figure 51) et les cycles journaliers sont assez bien identifiables.





**Figure 50 : Evolution de la turbidité mesurée par la seconde installation sur la paroi de la canalisation**



**Figure 51 : Evolution de la température au cours du temps pour la seconde installation sur la paroi de la canalisation**

Le zoom sur l'événement pluvieux du 28 juillet 2021 à la figure 52 montre une dynamique similaire de la turbidité à celle présentée à la figure 49. Un pic de turbidité est observé lors de la montée du niveau de l'eau dans la canalisation suivie d'une baisse rapide de la turbidité. Cette baisse a lieu alors que le niveau de l'eau monte encore. Les écarts entre les quartiles sont réduits lors de la crue tandis qu'ils augmentent lorsque le niveau de l'eau passe sous les 5 cm de hauteur. On retrouve ainsi la valeur déjà observée lors de l'installation précédente. Aussi, cette variation dans les écarts entre quartiles pourrait servir à détecter les périodes pour lesquelles la sonde n'est pas immergée. Il est intéressant de voir que le signal est assez peu bruité lorsque la sonde est totalement immergée alors que le signal est beaucoup plus variable lorsqu'elle est en partie hors de l'eau. Cette variabilité de la mesure peut être due à une dispersion partielle du rayonnement lumineux du fait que la sonde n'est que partiellement immergée.

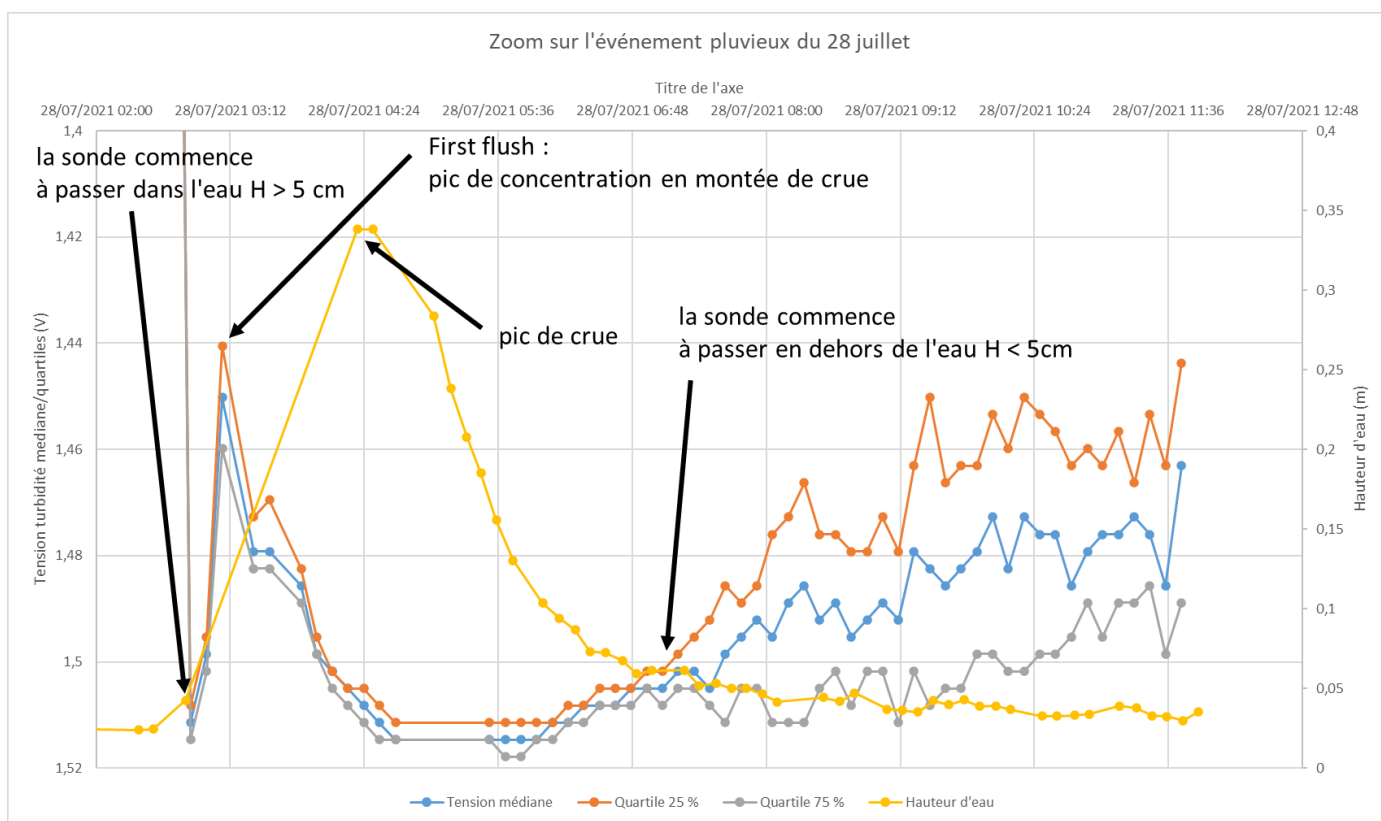


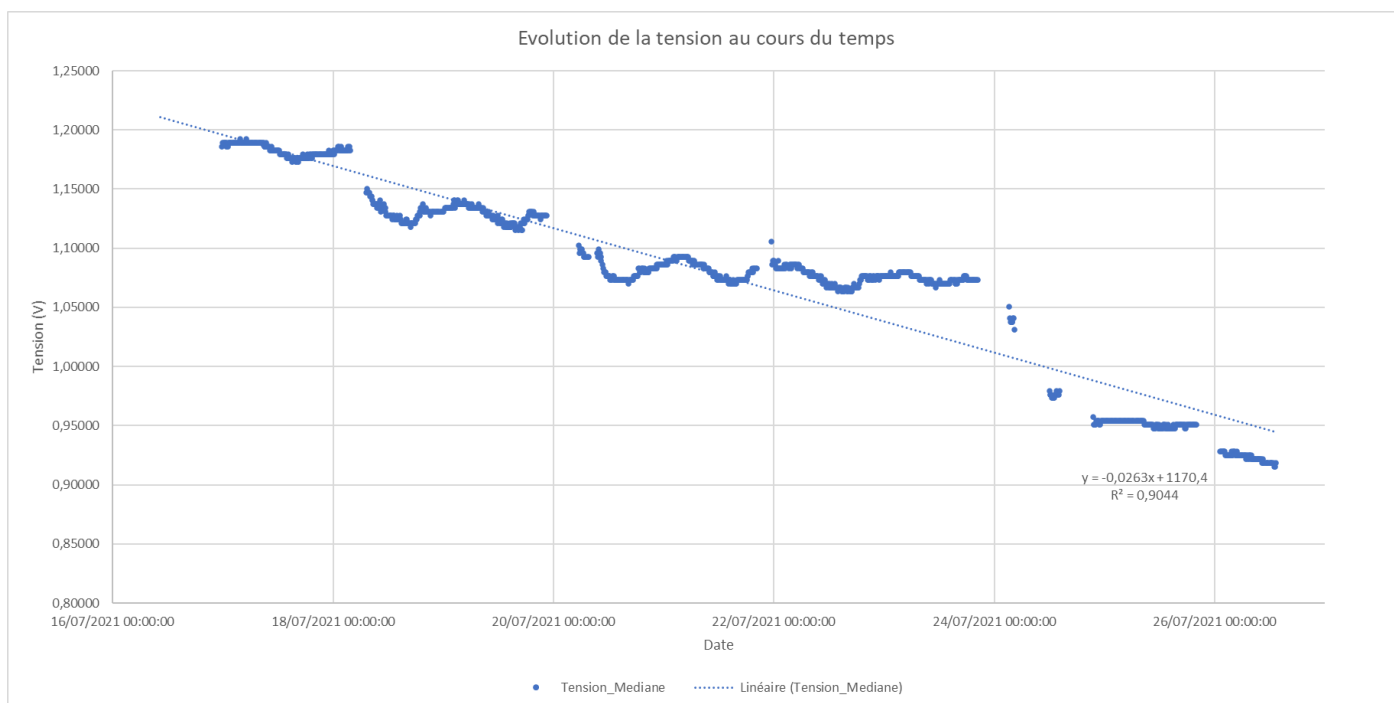
Figure 52 : Zoom sur l'événement pluvieux du 28 juillet 2021

#### 4.2.5 Compensation du fouling

Le fouling impactant la mesure de la turbidité, il est nécessaire de le caractériser et d'essayer de le compenser. Une première méthode serait de définir une fonction approximant l'évolution du fouling dans le temps et de corriger la valeur en conséquence. La figure 53 représente la mesure de la valeur médiale lors de la première installation dans la canalisation à laquelle ont été enlevées les mesures lors des périodes de pluie. Une régression linéaire donne un résultat assez satisfaisant en termes d'une première approximation. En connaissant l'équation de la droite, il devient possible de compenser la diminution du signal. Cependant, l'évolution du

fouling dans le cas de la seconde installation montre que si une approximation linéaire est satisfaisante localement, elle n'est pas valable sur de longues périodes puisque la diminution de la tension se stabilise à partir d'un certain moment. Une valeur seuil peut être définie de telle sorte qu'un signal soit envoyé une fois qu'une certaine valeur de tension est atteinte, indiquant qu'un nettoyage de la sonde est nécessaire. Le dépassement de cette valeur seuil doit se confirmer dans le temps pour éviter les faux-positifs ponctuels.

Des tests dans différents milieux pourraient être mis en place pour définir si une certaine pente



**Figure 53 : Linéarisation de la diminution de la tension due au fouling**

peut être caractérisée ou si une étude préalable à chaque installation doit être menée. Une autre solution pourrait être de définir un taux de variation entre deux valeurs en deçà duquel la variation est considérée comme étant due au fouling et peut être compensée. Des résultats précédents, les périodes de pluie sont caractérisées par des variations importantes de la turbidité que par temps sec. Si la variation est très faible, on peut considérer qu'elle est liée au fouling et la compenser. Cela entraîne de lier chaque valeur à la précédente, ce qui peut poser un problème lorsque des valeurs aberrantes sont ponctuellement enregistrées.

Les différentes expérimentations ont permis de montrer que la sonde de turbidité fonctionne correctement. Les tests in situ ont mis en évidence l'importance de la gestion du fouling, que ce soit mécaniquement en éliminant les dépôts ou électroniquement pour une compensation limitée dans le temps des résultats.

La particularité des réseaux pluviaux à n'être en eau que par périodes, ne laisse que des plages de temps assez courtes pour l'acquisition avec une sonde immergée. Des tests, dans un milieu autorisant des périodes de mise en eau plus longue comme une rivière, pourraient aussi être mis en place.

Enfin, la sonde transmettant ses données à distance, il est possible de définir une alerte à partir d'un certain seuil. Cette alerte informerait qu'un nettoyage mécanique doit être effectué.

## 5. Conclusions générales et perspectives

La sonde présentée dans ce rapport a montré un certain potentiel pour la mesure de turbidité à bas-coût. Les résultats obtenus sont encourageants et poussent à approfondir son développement. Le prix de la sonde, d'environ 200 € respecte la volonté d'un capteur bas-coût comparativement au prix du matériel d'acquisition disponible à la vente.

Les tests en laboratoire où les conditions sont maîtrisées sont satisfaisants. Les capteurs de turbidité présentés dans la littérature scientifique ne sont souvent éprouvés que dans le cadre du laboratoire et peu sur le terrain. Or, les résultats présentés dans ce rapport montrent que c'est l'acquisition sur le terrain qui conduit à la mise en évidence de contraintes plus importantes. Le fouling est l'une de ces difficultés qui est assez peu abordée dans la littérature alors que forcément présente sur toute mesure continue s'étalant sur des périodes conséquentes.

L'intermittence de la mise en eau de la sonde nécessiterait la mise en place d'un capteur de contact avec l'eau ou d'une détection informatique pour déterminer si les valeurs obtenues sont pour une sonde totalement immergée ou non.

L'expression de la turbidité mesurée dans une unité reconnue nécessite une calibration à partir d'échantillons de concentrations ou de turbidité connues. La calibration à partir des valeurs fournies par un autre appareil est aussi envisageable mais nécessite ledit matériel et l'assurance que celui-ci soit préalablement calibré correctement. Les sondes bas-coûts pouvant avoir des caractéristiques propres à chacune du fait des possibles variations entre leurs constituants, une calibration individuelle est nécessaire et ne peut être standardisée. Une calibration avec des solutions de turbidité connues permettrait des comparaisons avec les résultats de sondes professionnelles.

La prise en compte du fouling semble l'une des perspectives de développement les plus importantes. Une méthode de compensation pourrait être mise en place à partir du programme de la carte Arduino. Des modifications dans l'encapsulation peuvent aussi être envisagées. La forme particulière du capteur de turbidité est propice à l'accumulation de dépôts par la grande surface qu'elle représente. Se séparer de l'utilisation du capteur SKU SEN0189 au profit de la réalisation d'un capteur personnel est envisageable. En effet, il a été montré que peu d'éléments du capteur initial sont conservés, les LED et le circuit d'alimentation étant modifiés. Aussi, bien que pratique, s'en séparer pourrait faciliter le design de sonde en intégrant le potentiomètre au boîtier d'acquisition plutôt que sur la tête de la sonde. La difficulté résiderait alors dans un design de capuchon permettant la mesure par atténuation pour laquelle les LED doivent se regarder. Le passage à une mesure par néphélométrie est possible et simplifierait éventuellement la forme de la tête de la sonde.

L'enregistrement de plusieurs statistiques et notamment la médiane et les quartiles est utile car source d'information sur la qualité de la donnée collectée et les possibles dysfonctionnements de la sonde. Cette option n'est généralement pas possible avec les sondes professionnelles qui fournissent majoritairement une valeur moyenne seule. La littérature montre que ces statistiques sont aussi peu mesurées par d'autres sondes bas-coûts.

Enfin, le développement et la maîtrise du processus de calcul permet une adaptation de la métrologie plus libre et en accord avec les besoins.

# Bibliographie

---

Christopher D. Kelley, Alexander Krolick, Logan Brunner, Alison Burklund, Daniel Kahn, William P. Ball and Monroe Weber-Shirk (2014). *An Affordable Open-Source Turbidimeter*. *Sensors*, 14, 7142-7155. <https://doi.org/10.3390/s140407142>

Damian M. Lawler and Robert M. Brown. (1992). *A simple and inexpensive turbidity meter for the estimation of suspended sediment concentrations*. *Hydrological processes*, 6, 159-168. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360060204>

David Gillett and Alan Marchiori (2019). *A Low-Cost Continuous Turbidity Monitor*. *Sensors*, 19(14), 3039. <https://doi.org/10.3390/s19143039>

Filipa Sequeira, Daniel Duarte, Rogério Nogueira and Lúcia Bilro (2019). *Low-Cost Sensing with Plastic Optical Fibers—From Turbidity and Refractive Index to Chemical Sensing*. *Proceedings*, 15, 12. <https://doi.org/10.3390/proceedings2019015012>

Krieg Rabeski P., *Développement et tests en laboratoire de capteurs économes pour la métrologie des sédiments en suspension en rivière : Turbidité et couleur*, 2018. Master 2 de EVS Lyon 2

Lorena Parra, Javier Rocher, Julia Escrivá, Jaime Lloret (2018). *Design and development of low-cost smart turbidity sensor for water quality monitoring in fish farms*. *Aquacultural Engineering*, Volume 81, Pages 10-18. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2018.01.004>

Jarrold Trevathan, Wayne Read and Simon Schmidtke (2020). *Towards the Development of an Affordable and Practical Light Attenuation Turbidity Sensor for Remote Near Real-Time Aquatic Monitoring*. *Sensors*, 20(7), 1993. <https://doi.org/10.3390/s20071993>

Joshua M. Pearce (octobre 2020). *Economic savings for scientific free and open-source technology: A review*. *HardwareX*, Volume 8. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2020.e00139>

Maurer L., *Développement de capteurs low-cost basés sur la technologie Arduino, pour le suivi du transport solide en rivière : turbidité, couleur et charriage*, 2018. Master 2 de EVS Lyon 2

Michael Metzger, Alexander Konrad, Felix Blendinger, Andreas Modler, Alfred J. Meixner, Volker Bucher and Marc Brecht (2018). *Low-Cost GRIN-Lens-Based Nephelometric Turbidity Sensing in the Range of 0.1–1000 NTU*. *Sensors*, 18, 1115. <https://doi.org/10.3390/s18041115>

ONEMA, LEESU et IFSTTAR/LEE (avril 2015). *Guide technique sur le mesurage de la turbidité dans les réseaux d'assainissement*

Óscar Sampedro, José Ramón Salgueiro (2015). *Turbidimeter and RGB sensor for remote measurements in an aquatic medium*. *Measurement*, 68, 128–134. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2015.02.049>

Theofanis P. Lambrou, Christos C. Anastasiou, Christos G. Panayiotou, and Marios M. Polycarpou (2013). *A Low-Cost Sensor Network for Real Time Monitoring and Contamination Detection in Drinking Water Distribution Systems*. *IEEE Sensors Journal*, 14(8), 2765 – 2772, <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2316414>

Walcker N., Bertrand-Krajewski J.-L., Vacherie S., Lepot M., Castebrunet H., Barraud S., Lipeme Kouyi G. (2018). *Une nouvelle station de mesure pour l'acquisition de séries chronologiques en hydrologie urbaine*. TSM 3 2018, 55-63. <https://doi.org/10.1051/tsm/201803055>

Youchao Wang, S. M. Shariar Morshed Rajib, Chris Collins, and Bruce Grieve (2018). *Low-Cost Turbidity Sensor for Low-Power Wireless Monitoring of Fresh-Water Courses*. IEEE sensors journal, 18(11), 4689, <https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2826778>

Yuanyang Zhu, Pingping Cao, Sheng Liu, Ying Zheng, and Chaoqun Huang (2020). *Development of a New Method for Turbidity Measurement Using Two NIR Digital Cameras*. ACS Omega, 5, 5421–5428. <https://dx.doi.org/10.1021/acsomega.9b04488>

Zhenzhong Zang, Xuanbing Qiu, Yongmei Guan, Enhua Zhang, Qi Liu, Xiaohu He, Guqing Guo, Chuanliang Li, Ming Yang (2020). *A novel low-cost turbidity sensor for in-situ extraction in TCM using spectral components of transmitted and scattered light*. Measurement, 160, 107838. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107838>

## Sitographie

---

Fiche technique de la sonde de température DS18B20, obtainable sur le site de DFRobot : [https://wiki.dfrobot.com/Waterproof\\_DS18B20\\_Digital\\_Temperature\\_Sensor\\_SKU\\_DFR0198](https://wiki.dfrobot.com/Waterproof_DS18B20_Digital_Temperature_Sensor_SKU_DFR0198) (consulté le 27 mai 2021)

Fiche technique de la sonde de turbidité SKU SEN0189, obtainable sur le site de DFRobot : [https://wiki.dfrobot.com/Turbidity\\_sensor\\_SKU\\_SEN0189](https://wiki.dfrobot.com/Turbidity_sensor_SKU_SEN0189) (consulté le 27 mai 2021)

Graie, Présentation des sites, [https://www.graie.org/othu/ptsite\\_2.htm](https://www.graie.org/othu/ptsite_2.htm) (consulté le 4 août 2021)

Graie, Projet Cheap'Eau, [https://www.graie.org/othu/progr\\_cheapeau.htm](https://www.graie.org/othu/progr_cheapeau.htm) (consulté le 12 avril 2021)

LoRa Alliance, <https://lora-alliance.org/about-lorawan/> (consulté le 13 août 2021)

The Things Network, <https://www.thethingsnetwork.org/country/france/> (consulté le 13 août)

# Annexes

---

## Annexe 1 : Code Arduino de la sonde de turbidité (Version carte MKR Wan)

```
#include <MKRWAN.h>
#include <Wire.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <RTCLib.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <RunningMedian.h>

LoRaModem modem;
RTC_DS3231 rtc;
DateTime debutMesureTPL;
File dataFile;
File rowDataFile;

unsigned long previousMillis = 0; // Précédent temps de mesure
int timeStep = 1000; // Pas de temps entre chaque mesure (ms)
int delayTime = 200; // Temps de basculement de la diode (ms)
int pinTimer = 6; // Pin utilisé pour le temps
int pinSD = 4; // Pin utilisé pour la carte SD
int sensorSupply = 5; // Alimentation de la sonde modifiée
int sensorOutput = A1; // Signal de sortie sonde modifiée
int pinBattery = A2; // Pin utilisé pour la tension de la batterie
int sensorIndex = 0; // Nombre de mesures à moyenner
RunningMedian sensorTable = RunningMedian(60); // Table des valeurs obtenues sur
// une minute
#define ONE_WIRE_BUS 2 // Pin utilisé pour la température
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);

const char *appEui = "0103050709080604";
const char *appKey = "8E2A8B6BBF0F98302420D69EDC0CF058";

void setup() {
  /* Définition des E/S */
  Serial.begin(9600);
  pinMode(pinTimer, OUTPUT);
  digitalWrite(pinTimer, LOW);
  pinMode(sensorOutput, INPUT);
  pinMode(sensorSupply, OUTPUT);
  pinMode(pinBattery, INPUT);
}
```

```

/* Initialisation de la connection LoRa, du timer et de la température */
modem.begin(EU868);
int connected = modem.joinOTAA(appEui, appKey);
rtc.begin();
sensors.begin();

/* Initialisation du fichier d'enregistrement */
SD.begin(pinSD);
if (SD.exists("Data.txt")) {
    File dataFile = SD.open("Data.txt", FILE_WRITE);
    dataFile.close();
}
else {
    File dataFile = SD.open("Data.txt", FILE_WRITE);
    dataFile.println("Horodatage\tTension Médiane (V)\tTension Moyenne (V)\tTension
Minimale (V)\t Tension Maximale (V)\tVariance\tQuantile 25 %\tQuantile 75 %\tTempe
rature (°C)\tTension Batterie (V)");
    dataFile.close();
}
if (SD.exists("RowData.txt")) {
    File rowDataFile = SD.open("RowData.txt", FILE_WRITE);
    rowDataFile.close();
}
else {
    File rowDataFile = SD.open("RowData.txt", FILE_WRITE);
    rowDataFile.println("Index\tTension Finale (V)\tTension HIGH (V)\t Tension LOW
(V)");
    rowDataFile.close();
}
}

void loop() {
    if (sensorIndex < 60 && millis() - previousMillis >= timeStep) {
        previousMillis = millis();

        /* Allumage de la diode émettrice */
        digitalWrite(sensorSupply, HIGH);
        delay(delayTime);

        /* Obtention de la mesure HIGH */
        int sensorValueHIGH = analogRead(sensorOutput);

        /* Extinction de la diode émettrice */
        digitalWrite(sensorSupply, LOW);
        delay(delayTime);

        /* Obtention de la mesure LOW */
        int sensorValueLOW = analogRead(sensorOutput);

        /* Calcul de la différence et enregistrement dans la table */
        int sensorValueDifference = sensorValueHIGH - sensorValueLOW;
    }
}

```



```

sensorTable.add(sensorValueDifference);
sensorIndex += 1;
Serial.print(sensorIndex); Serial.print("\t");
Serial.print(sensorValueDifference); Serial.print("\t");
Serial.print(sensorValueHIGH); Serial.print("\t");
Serial.println(sensorValueLOW);
rowDataFile = SD.open("RowData.txt", FILE_WRITE);
rowDataFile.print(sensorIndex); rowDataFile.print("\t");
rowDataFile.print(sensorValueDifference); rowDataFile.print("\t");
rowDataFile.print(sensorValueHIGH); rowDataFile.print("\t");
rowDataFile.println(sensorValueLOW);
rowDataFile.close();
}

if (sensorIndex >= 60) {
  /* Obtention de l'horodatage et mise en forme sur 4 bits */
  debutMesureTPL = rtc.now();
  long dateHeure = debutMesureTPL.unixtime();
  byte Adate = dateHeure / (256*256*256);
  byte Bdate = (dateHeure - Adate * (256*256*256)) / (256*256);
  byte Cdate = (dateHeure - Adate * (256*256*256) - Bdate*(256*256)) / (256);
  byte Ddate = (dateHeure - Adate * (256*256*256) - Bdate*(256*256)) % (256);

  /* Obtention de la valeur médiane, moyenne, minimale et maximale sur une minute
  */
  uint16_t sensorMedian = sensorTable.getMedian();
  uint16_t sensorAverage = sensorTable.getAverage();
  uint16_t sensorMin = sensorTable.getLowest();
  uint16_t sensorMax = sensorTable.getHighest();
  uint16_t quantile25 = sensorTable.getQuantile(0.25);
  uint16_t quantile75 = sensorTable.getQuantile(0.75);

  /* Obtention de la température */
  sensors.requestTemperatures();
  float tempC = sensors.getTempCByIndex(0);
  uint16_t temperature = round(tempC * 1000);

  /* Obtention de la tension de la batterie */
  uint16_t batteryValue = analogRead(pinBattery) * 2;

  /* Calcul de la variance */
  int indice;
  int tempValue;
  float variance = 0;
  for(indice = 0; indice < 60; indice++){
    tempValue = sensorTable.getElement(indice);
    variance += pow((tempValue - sensorAverage) * (3.3 / 1024.0), 2);
  }
  variance /= 60;
  uint16_t varianceByte = round(variance * 1000);

```

```

/* Transformation des valeurs analogiques en tensions */
float sensorMedianTension = sensorMedian * (3.3/1024.0);
float sensorAverageTension = sensorAverage * (3.3/1024.0);
float sensorMinTension = sensorMin * (3.3/1024.0);
float sensorMaxTension = sensorMax * (3.3/1024.0);
float quantile25Tension = quantile25 * (3.3/1024.0);
float quantile75Tension = quantile75 * (3.3/1024.0);
float batteryTension = batteryValue * (3.3/1024.0);

/* Enregistrement des résultats sur la carte SD */
dataFile = SD.open("Data.txt", FILE_WRITE);
dataFile.print(dateHeure); dataFile.print("\t");
dataFile.print(sensorMedianTension, 3); dataFile.print("\t");
dataFile.print(sensorAverageTension, 3); dataFile.print("\t");
dataFile.print(sensorMinTension, 3); dataFile.print("\t");
dataFile.print(sensorMaxTension, 3); dataFile.print("\t");
dataFile.print(variance, 3); dataFile.print("\t");
dataFile.print(quantile25Tension, 3); dataFile.print("\t");
dataFile.print(quantile75Tension, 3); dataFile.print("\t");
dataFile.print(tempC); dataFile.print("\t");
dataFile.println(batteryTension);
dataFile.close();
Serial.println("Enregistrement SD fait");
Serial.print(sensorMedianTension); Serial.print("\t");
Serial.print(sensorAverageTension); Serial.print("\t");
Serial.print(sensorMinTension); Serial.print("\t");
Serial.print(sensorMaxTension); Serial.print("\t");
Serial.print(variance); Serial.print("\t");
Serial.print(quantile25Tension, 3); Serial.print("\t");
Serial.print(quantile75Tension, 3); Serial.print("\t");
Serial.print(tempC); Serial.print("\t");
Serial.println(batteryTension);
Serial.println("Avant envoi");

/* Envoi des données par LoRa */
byte payload[22];
payload[0] = Adate;
payload[1] = Bdate;
payload[2] = Cdate;
payload[3] = Ddate;
payload[4] = highByte(sensorMedian);
payload[5] = lowByte(sensorMedian);
payload[6] = highByte(sensorAverage);
payload[7] = lowByte(sensorAverage);
payload[8] = highByte(sensorMin);
payload[9] = lowByte(sensorMin);
payload[10] = highByte(sensorMax);
payload[11] = lowByte(sensorMax);
payload[12] = highByte(varianceByte);
payload[13] = lowByte(varianceByte);
payload[14] = highByte(quantile25);

```

```

payload[15] = lowByte(quantile25);
payload[16] = highByte(quantile75);
payload[17] = lowByte(quantile75);
payload[18] = highByte(temperature);
payload[19] = lowByte(temperature);
payload[20] = highByte(batteryValue);
payload[21] = lowByte(batteryValue);
modem.setPort(3);
modem.beginPacket();
modem.write(payload, sizeof(payload));
int err = modem.endPacket(true);
modem.sleep();
delay (5000);
Serial.println("Apres envoi");

/* Réinitialisation de la table */
sensorIndex = 0;
sensorTable.clear();

/* Extinction du nanotimer */
Serial.println("Fin");
int fin;
for (fin = 0; fin < 6; fin++){
    digitalWrite(pinTimer, HIGH);
    delay(500);
    digitalWrite(pinTimer, LOW);
    delay(500);
}
}
}

```