PROTEGE

Rapport du projet Open Lagoon

Rapport final

Open Source Oceanography

Décembre 2023

Financé par l'Union européenne
Pacific Community Communauté du Pacifique
Nouvelle Calédonie
Polynésie française
Wallis et Futuna
Îles Pitcairn
Direction des Ressources Marines Pu Fa'ahotu Moana
Université Paris Cité
cnrs
LOCEAN
Astrolabe Expeditions
Ifremer
LEMAR
IRD Institut de Recherche pour le Développement
RESOLAG

Crédit photographique :

Figure 1 & 2 : Vetea Liao
Figure 18, 19, 25, et 40 : Google Earth
Toutes les autres figures et photographies : Cédric Courson

Financement :

DRM : Financement principale du projet Open Lagoon
Université de Paris : Financement doctorale
Astrolabe Expéditions : Soutien technique et financier au projet

INTRODUCTION 4

CONTEXTE SP LOCAL ET ENJEU 5

Enjeu levier du milieu perlicole 5

Panorama des projets de SP et opportunité de déploiement 6

CONCEPTION INSTRUMENTALE 8

Fiche instrument caractéristiques techniques 8

Choix technologique (CDC) 8

Version opérationnelle 10

Assemblage 14

Utilisation et entretien 15

CONSTRUCTION ET ENTRETIEN LOCAL 17

Les moyens locaux DRM et Ifremer 17

Ressources pour construction et entretien 18

Estimation coût de production 20

EXPERIMENTATION PRELINAIRE ; PROJET OBS SALOUM 21

Obs-Saloum – essai préliminaire au Sénégal 21

EXPERIMENTATION OPEN-LAGOON 23

Tahiti – Lagon Vairao – test fluorimètre 24

Open-Lagoon : Mission de validation in-situ à Ahe 28

Open Lagoon – Inter comparaison de capteur de fluorimétrie - Ahe 29

Open Lagoon – Déploiement longue durée – Lagon Ahe 32

Antifouling – Test prototype à Vairao 37

CONCLUSION & PERSPECTIVES 41

Performances 41

Autonomie 41

Antifouling 41

Développement local 42

BIBLIOGRAPHIE 43

ANNEXES 1 – LIENS FCHIERS SOURCE 44

ANNEXE 2 – COUT DES COMPOSANTS ET FOURNISSEURS 45

INTRODUCTION

Ce rapport reprend des éléments des rapports intermédiaire, il vise à établir un bilan des opérations réalisés dans le cadre du projet Open Lagoon.

Cadre du projet

Open Lagoon est un projet d'étude de la chlorophylle des eaux lagonaires à l'aide d'instrumentation open source et des sciences citoyennes.

Il est réalisé dans le cadre d'une thèse de Cédric Courson, financé par la DRM et l'Université et Paris et en partenariat avec le LOCEAN(CNRS), la DRM, Ifremer Polynésie, Astrolabe Expeditions et le LEMAR (IRD).

Rappel du contexte scientifique : Le problème de la chlorophylle dans les eaux lagonaires

Le phytoplancton a un impact très important sur les écosystèmes océaniques. Il produit l'oxygène que l'on respire, et en servant de nourriture à bon nombre d'espèces, il est l'organisme à la base de toute la chaîne alimentaire. Son abondance se mesure grâce à la quantité de chlorophylle présente dans l'eau.

Pour le développement de la perliculture et de l'aquaculture il est nécessaire de pouvoir suivre la qualité des eaux des lagons, et en particulier de connaître l'évolution du phytoplancton, nourriture de base des huîtres. Afin de pouvoir suivre et contrôler le développement de la perliculture il est important de connaitre le potentiel de reproduction des huîtres dans les lagons. Ce potentiel se détermine en fonction de la quantité de nourriture présente dans les eaux, et en fonction de leurs paramètres physico-chimiques. Les variations annuelles de phytoplancton influent donc directement sur la production.

Les blooms (efflorescences de phytoplancton) en particulier sont des phénomènes très impactant et encore trop peu connus. Une compréhension majeure de ces phénomènes est aujourd'hui nécessaire pour la pérennité des activités marines dans les lagons. Actuellement nous disposons de très peu de données observationnelles sur ces phénomènes, il est en particulier difficile d'observer la cinétique complète du phénomène par manque de données in-situ en temps réel. Les coûts et difficultés locales d'entretien de ces instruments sont la principale cause de ce manque de données.

Des instruments à bas-coût, et suffisamment accessibles pour être construits et entretenus localement pourraient résoudre cette difficulté.

Action et déploiement réalisé

Durant ce projet plusieurs actions en pu être réalisés et seront détaillés dans ce rapport :

- Développement d'instrument de mesure multi-paramètres océanographique open-source pour la mesure des paramètres physico-chimique tel que température, chlorophylle, pression, salinité, dans les lagons.
- Test dans une ferme perlicole des instruments et comparaison avec des instruments professionnels
- Enquête de terrain pour étudier la faisabilité de construction et d'entretien des instruments en local sur Tahiti.
- Enquête de terrain pour estimer le potentiel de déploiement d'un réseau d'instrument via une participation citoyenne
- Formation d'acteur locaux pour la construction et le déploiement d'instrument
- Test/étude de faisabilité de système antifouling

CONTEXTE SP LOCAL ET ENJEU

ENJEU LEVIER DU MILIEU PERLICOLE

Les acteurs suivants ont pu être rencontré pour discuter de leurs activités et de projet de déploiement d'instrument de mesure dans les lagons.

- Ferme perlière de Maeva Wan
- Perliculteur Makiroto
- Comité de perliculture à Ahe

Ces rencontres ont eu lieu dans plusieurs contextes, soit au cours d'interview particulier des perliculteurs, soit en entretien informel, soit en assistant au comité de perliculture d'Ahe, qui à réunit les représentants de la DRM et tous les perliculteurs de l'atoll.

Durant ces entretiens l'intérêt des perliculteurs pour l'état de santé du lagon était évident en raison de leurs travaux de cultures perlière in-situ. Et pour connaitre l'état de santé du lagon plusieurs indicateurs sont ressortie : des indicateurs écophysiologique, tel que la bonne croissance des nacres dans tel ou tel environnement, la présence de prédateur, ou encore la présence d'espèce invasif. Des indicateurs de pollutions, la développement ou l'absence de développement de certaine espèce en fonction des pollutions (biologique, chimique et physique). Et enfin des indicateurs physico-chimiques permettent d'avoir une « lecture » direct de l'environnement lagonaire. Sauf que pour ce dernier indicateur, les perliculteurs regrette la faible présence, voire la total absence d'instrument.

La présence d'instrument de mesure dans le lagon, voire même directement dans les fermes à été manifesté comme un intérêt certain pour la gestion directe des cultures. En effet la visualisation des paramètres physiques du lagon en temps réel, permettrai de pouvoir adapter les cultures au modifications temps réels de ces paramètres. Par exemple si la température monte et qu'il faut descendre les nacres pour les protéger du chaud, ou voire directement la présence de chlorophylle source de nourriture des huîtres perlières, et donc adapter les emplacements en fonction de la concentration de chlorophylle ou même d'oxygène. Cela permettrait donc d'adopter une stratégie d'emplacement basé sur des paramètres factuel quantifiable, et même d'établir une « météo » du lagon pour gérer les modifications à apporter aux cultures en fonctions des évolutions de ces paramètres.

On a pu remarquer que les fermes équipés de capteurs était fier de leur installation et de leur participation à un programme scientifique. En plus des avantages cités ci-dessus, cela leur donne une forme de connaissance supplémentaire par rapport aux autres perliculteurs. Cette connaissance est un atout majeur qui leur octroi une place particulière dans l'écosystème des perliculteurs. Cela devient une forme de pouvoir politiques pour les possesseurs de ce savoir.

Ces trois facteurs nous semblent être des leviers importants à prendre en compte pour l'implication des perliculteurs dans un programme comme Open Lagoon.

PANORAMA DES PROJETS DE SP ET OPPORTUNITE DE DEPLOIEMENT

Durant l'enquête de terrain nous avons rencontré plusieurs acteurs polynésiens de programme de sciences participative ou impliquer dans la protection des lagons. Ces acteurs sont soit des associations soit des instituts scientifiques qui pratique des programmes ouverts aux citoyens.

Nous avons rencontré :

Acteur associatif et centre de recherche

- **Tama no te tairoto** : association pour améliorer et partager la connaissance du Lagon.
- **Oceania** : association d'étude et de protection des cétacés du sanctuaire polynésien.
- **Mokarran protection society** : Association pour l'étude et la protection du grand requin marteau en Polynésie.
- **Ta mana o te moana** : association qui agit pour comprendre, soigner et protéger les tortues marines de Polynésie française
- **Rahui center** : accompagne les autorités et communautés dans la définition et la mise en place d'Aires Marines Gérées en Polynésie française
- **Criobe** : programme d'observation participative du corail.

Tous ces acteurs ont pu être rencontré une ou plusieurs fois, et le projet Open Lagon leur a été soumis. La rencontre avait pour objet de se présenter, de connaître leur force et type d'activité et d'y détecté une potentiel source pour déployer des instruments en mer.

Parmi 3 acteurs ont des activités, un réseau et un mode fonctionnement qui présente un fort potentiel pour le développement d'Open Lagoon. Le plus important est l'association Tama no te tairoto qui dispose d'un réseau d'observateur très important : plus de 200 observations simultanées régulière sur tout le territoire polynésien. Ces observations sont réalisées presque tous les mois sur tout le territoire, et concernent le corail et en particulier la ponte des coraux. De par la taille du réseau, mais aussi par l'emplacement des observations du est faite directement dans les lagons, il y a fort potentiel de développement pour Open Lagoon. Les observateurs, essentiellement des habitants, de ce réseau pourrait en effet régulièrement ajouter des opérations sur les instruments d'Open Lagoon (récupération/déploiement). Ici les observateurs sont à pied ou en moyen à la mer léger (pirogue). Les déploiements concernent donc principalement ces zones, ce qui offre déjà par ce moyen et la taille du réseau une surface importante d'observation en lagon.

L'association Oceania dispose également d'un grand réseau d'observateurs pour l'observation des baleines en mer. Il s'agit d'observateur qui sont déployer sur navires de pêches ou de commerces. L'une des forces de ce réseau et le type de partenariat et d'échange réaliser avec les pêcheurs et commerciaux. Ils seraient à priori possible de s'appuyer sur ce partenariat pour déployer des observatoires en mer. La faiblesse pour notre projet est que les observations ont lieu essentiellement en mer et non dans les lagons, mais d'après l'association il est possible d'envisager des actions en lagon avec certain de leurs acteurs. Ici, même si peu d'acteur sont en lagon, leur force tient dans des moyens à la mer plus importants (bateau à moteur, de pêche etc…), et dans leur capacité à élargir le territoire d'observation aux delà du Lagoon.

L'association Mokarran réalise des plongés pour l'observation du requin marteau sur Rangiroa principalement mais aussi sur d'autre Atoll, il ne s'agit pas d'un réseau aussi important d'acteur que les associations précédentes, mais d'acteurs disposant de ressources importantes pour aller en mer réaliser des observations. Ils sont capables de réaliser de grandes plongées et d'organiser des expéditions importantes sur un grand voilier. Ils sont intéressés des développements d'instruments open source et pourrai être d'une grande aide pour des opérations sous-marine sur les territoires concernés.

Acteur lié à la fabrication

- Tahiti Robotics : entreprise de robotiques
- ElectroSAV : fourniture de matériel électronique
- Prism : Polynesian Factory : future Fablab

Parmi ces acteurs Tahiti Robotics a été rencontré dans le cadre du projet, son expertise en robotique sous-marine peut être utile pour de futur développement. ElecroSAV fournit du matériel électronique, on peut aussi lui commander des composants particuliers.

La Polynesian Factory est un acteur très prometteur. C'est un Fablab qui est court de création. Et en tant que Fablab c'est lieu qui pourrait devenir centrale pour le développement de capteur open source marine. De par la mise à disposition d'outils, mais aussi parce qu'association et citoyen pourront alors bénéficier d'un espace pour ces développements.

Autres acteurs sur Tahiti

Ces acteurs n'ont pas été rencontrée, mais ont été identifié comme acteur intéressant du réseau :

- FAPE : La Fédération des Associations de Protection de l'environnement
- OFB : Office Français de la Biodiversité.
- Gump Station à Moorea : institut de recherche
- Coral Gardiners : association de protection du corail
- UICN : L'Union internationale pour la conservation de la nature

Figure 1 : Déploiement d'un mouillage avec sonde multi-paramètre. Lagon Ahe

CONCEPTION INSTRUMENTALE

FICHE INSTRUMENT CARACTERISTIQUES TECHNIQUES

Instrument multi-paramètres open source pour l'océanographie (OSO) qui mesure les paramètres physique et chimique de l'eau de mer. Immergeable en milieu littoral, cet instrument permet de réaliser les mesures suivantes (avec précision) :

- ✓ Température (+/- 0.1°C)
- ✓ Profondeur (+/- 3cm)
- ✓ Conductivité (+/- 0.1PSU)
- ✓ Chlorophylle (+/- 0.03 µg/L)

Il présente les caractéristiques suivantes :

- ✓ Autonomie : 1 à 12 mois sur batterie (selon le nombre de batterie et configuration)
- ✓ Possibilité d'ajout de panneau solaire pour autonomie infinie
- ✓ Possibilité d'ajout de système antifouling (LED ou balai)
- ✓ Entièrement configurable et paramétrable
- ✓ Dimension : 460mm (longueur) x 105mm (diamètre)
- ✓ Poids : 2.4kg (selon configuration de batterie)

CHOIX TECHNOLOGIQUE (CDC)

Vers du middle-cost

Dans les lagons perlicoles, les variations de Chlorophylle dans l'eau de mer peuvent atteindre des minimums de 0.1 à 0.5 µg/L. On vise donc à obtenir un détecteur capable de détecter ces variations. C'est à dire un détecteur avec une limite de détection d'au moins 0.05 à 0.1 µg/L.

Une revue des instruments low-cost en fluorimétrie montre qu'il est encore difficile d'atteindre cette résolution. C'est pourquoi, pour les besoins du projet d'obtenir rapidement des mesures scientifiques utiles, nous avons opter pour une solution middle-cost. Utilisant un data logger open-source low-cost sur lequel on ajouter un capteur de fluorimétrie du commerce un peu plus cher.

Le coût total du système avoisine ainsi les 4000€ pièce.

L'instrument reste open source et entièrement fabricable et réparable sur place, ce qui était aussi l'objectif. Permettant de réduire significativement les coûts de déploiement et maintenance des parcs d'instrument de mesure.

Choix des matériaux et construction en fablab

Pour une facilité de construction tout en ayant un instrument de précision il a fallu choisir des matériaux et des outils de constructions spécifique à notre besoin mais aussi que l'on trouve facilement. En plus des laboratoires universitaire ou d'institut scientifique, il existe un réseau de plus d'un millier de Fablab dans le monde. Ce sont des laboratoires citoyens ouvert à tous qui dispose d'équipement standardisé et comparable. Ainsi, en utilisant les ressources d'un fablab et en adaptant le design à ces ressources, on s'assure que l'objet est reproductible dans tous les fablabs du monde (comme les laboratoires universitaires ou les équipements sont similaire).

Pour notre projet nous utiliseront des composants électroniques modulaires, c'est-à-dire des modules à électronique qui exercent chacun une fonction et que l'on assemble pour obtenir le résultat souhaité. Et nous utiliserons des matériaux et machines disponibles des laboratoires tel que PMMA, PVC, découpe laser, perceuse, etc…

Le design de l'instrument est prévu pour pouvoir être assemblé sans compétence mécanique ou électronique trop importante, ainsi le travail mécanique est réalisable par n'importe quel bricoleur ou peut s'apprendre très rapidement, et les soudures des parties électroniques sont d'un niveau technique de niveau collège.

La modification du code ou du design électronique nécessite un apprentissage et des compétences plus importante (de niveau ingénieur), mais cela uniquement en vue de réaliser des modifications importantes à la configuration actuelle. Pour une utilisation normale sur le terrain et en laboratoire, il n'est pas nécessaire de disposer de compétences poussées.

Communication

Au départ nous avions imaginé un moyen de communication temps réel pour nos instruments. Il s'est avéré à l'utilisation que ce n'était pas nécessaire dans un 1er temps, et avons laisser ce développement de coté pour un futur projet. Certaines infos à ce sujet sont disponibles dans les rapports préliminaires.

Déployabilité

Dans son utilisation, l'instrument est prévu pour pouvoir être opéré par un citoyen averti ou un technicien qui recevrai une formation minimale. Ainsi un simple ordinateur pouvant lire une carte SD permet de configurer l'instrument et lire les données. Pour opérer l'instrument sur le terrain, il suffit de l'allumer et de le déployer en s'étant assuré de l'étanchéité et du bon lestage.

Figure 2 : Déploiement d'instrument en Lagon. Lagon Ahe

VERSION OPERATIONNELLE

Au cours du projet plusieurs version ont pu être testé avec différents composant, pour les versions précédentes, on pourra se reporter aux rapports préliminaires. Ici est présenté la version 4.0, version opérationnelle et déployable sur le terrain.

Composants détaillés

Partie Data-logger (partie électronique dédié au pilotage des capteurs et l'enregistrements des données sur une carte mémoire) :

- Microcontrôleur ESP32 firebeetle DFRobot
- Horloge RTC DS3231 (utilisable module DF robot, ou générique)
- Carte mémoire micro SD (module DF robot, ou sparkfun, ou générique)

Interface homme-machine (IMH) (Ces composants permettent d'interagir avec l'instrument et d'avoir des informations en retour) :

- Ecran Epaper waveshare 2,9''
- Interrupteur en ensemble de borniers pour faciliter le branchement avec la carte d'alimentation et les batteries.
- LED de fonctionnement
- Interrupteur à aimant pour la fonction wifi serveur
- Buzzer

Gestion énergie (les composants pour gérer l'énergie du système) :

- Module d'alimentation : DfRobot power management (avec sortie 3,3v, 5v, 12v)
- Batterie 18650 (3,7v 3400mAh) x6 : 3,7v 20400mAh

Les capteurs (les parties de l'instrument qui sont au contact de l'eau et captent les données réelles) :

- Pression : capteur Blue Robotic Bar30, ou Bar100
- Température : capteur Blue Robotic Fast Temp.
- Salinité : conductimètre atlas scientific avec module d'opto-isolation Atlas Scientific
- Fluorimètre : Turner C-Fluor, ou Trilux Chelsea technology (+ module max3232)
- Température interne ds18b20

Partie mécanique (le boitier de l'instrument pour protéger l'électronique):

- L'ensemble est inséré dans un tube en PVC étanche à l'immersion
- Platine support de PCB et batterie
- Bouchon aux deux extrémités avec joint et tige de compression des joints

Antifouling (il s'agit ici uniquement de support prévu pour des composants actifs pour la protection des capteurs contre le fouling, cette partie n'étant pas encore 100% opérationnel mécaniquement parlant, mais la partie électronique est prévu et fonctionnelle) :

- 2 emplacements pour LED UCV
- 1 emplacement pour servomoteur pour balai

Vue d'ensemble

Figure 3: Vue d'ensemble du boitier, on voit les bouchons avant (bouchon avec capteur) et arrière (transparent) qui permettent de fermer le tube blanc. Bouchon et tube constitue le boiter.

Figure 5 : Vue intérieur coté carte mère

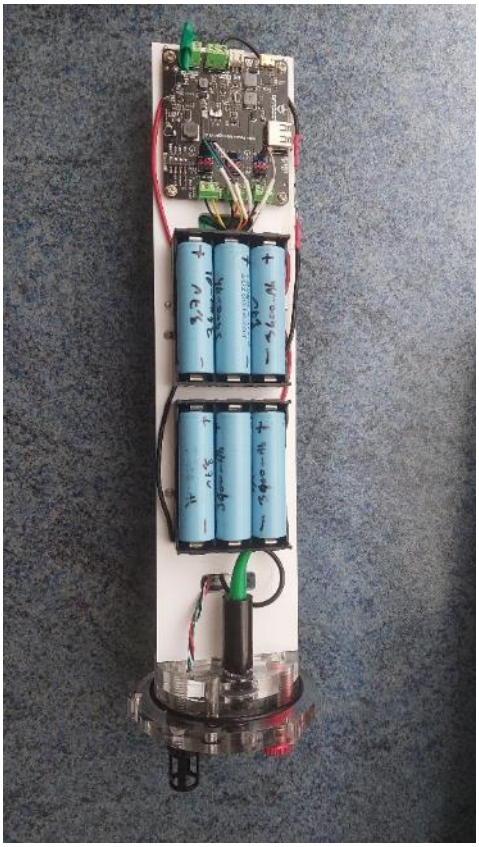


Figure 4 : Vue intérieur coté alimentation

Plans électroniques

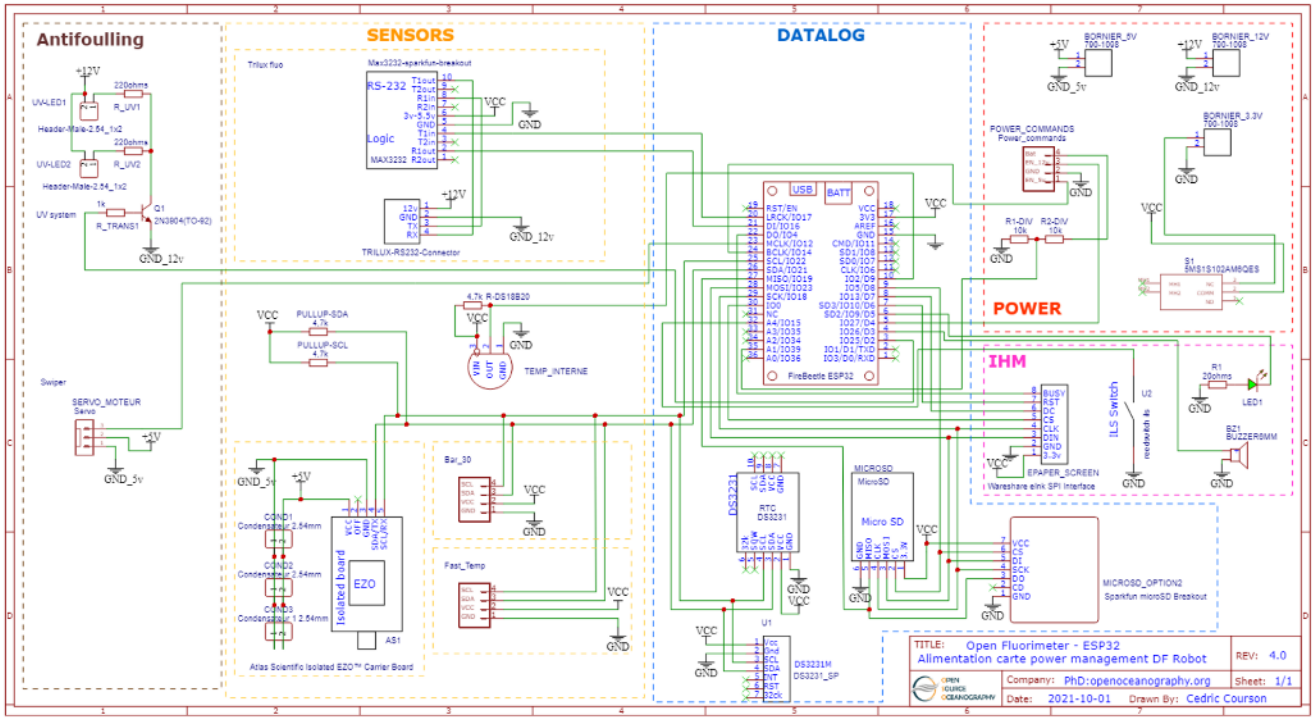


Figure 6 : Schéma électronique de la carte mère de l'instrument

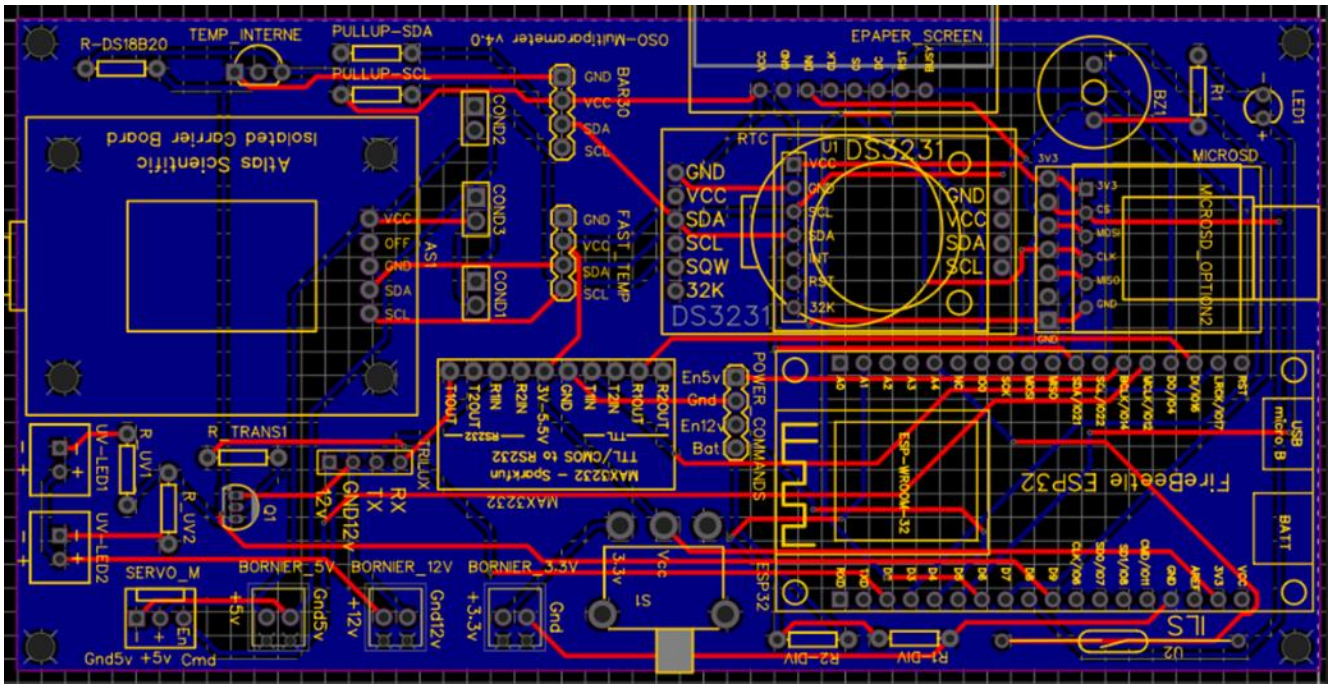


Figure 7: Plan du PCB (carte électronique)

Ces plans sont disponibles sur l'espace GitHub en version Gerber. Les fichiers Gerber sont à fournir directement à un service d'impression de PCB, qui les réalisera sous 10/15j et les enverra par colis (le chapitre sur la construction détail les fournisseurs).

Plans mécaniques

Pour la partie mécanique il faut réaliser ou faire réaliser des pièces dans des matériaux comme le PMMA ou le PVC.

Pour la réalisation de ces pièces ont a conçu des plan 2D qu'il suffit d'entrer dans une machine de découpe laser ou découpe jet d'eau (ou donnée à un fournisseur qui fera la découpe).

Voici les plans des pièces à fabriquer. Ces plans sont disponibles en fichiers 2D (vectoriels) sur le GitHub du projet dont le lien est fourni en annexe.

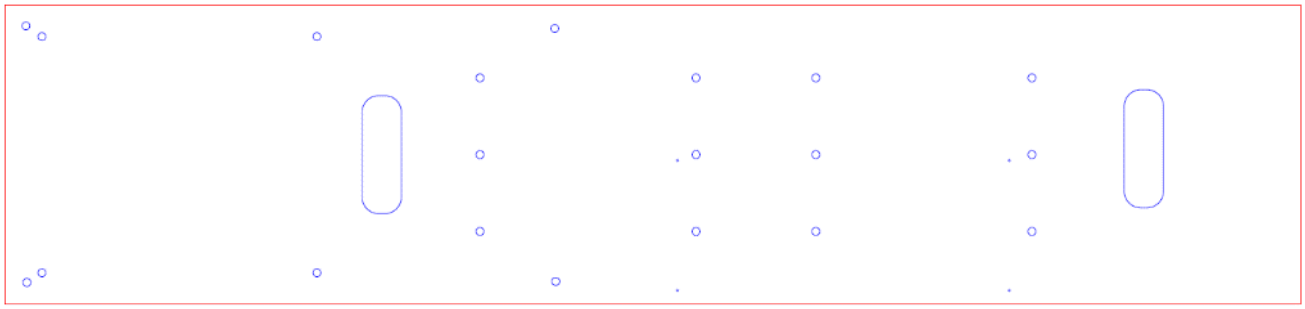


Figure 8 : plaque centrale qui supporte les composants électroniques

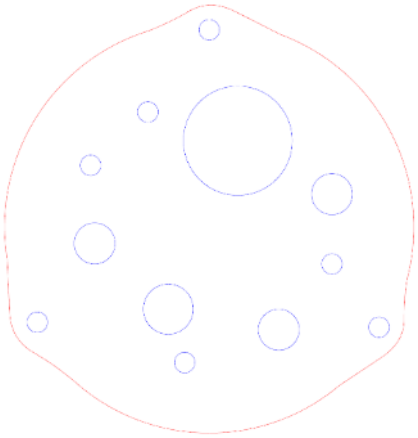


Figure 9 : Disque externe coté capteur

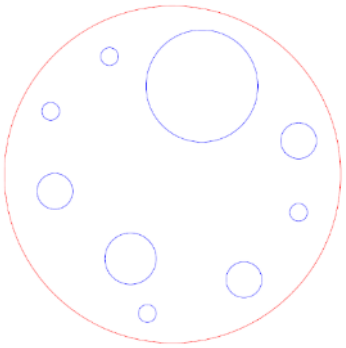


Figure 10 : Disque interne coté capteur (x2)

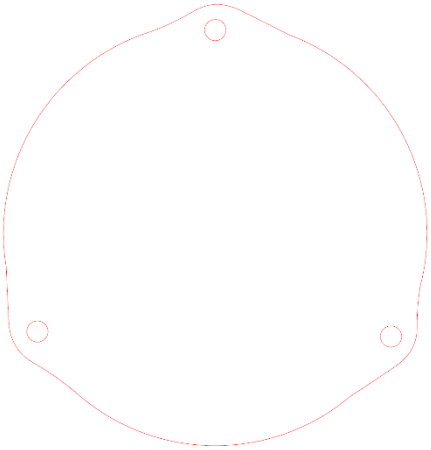


Figure 11 : Disque externe coté bouchon

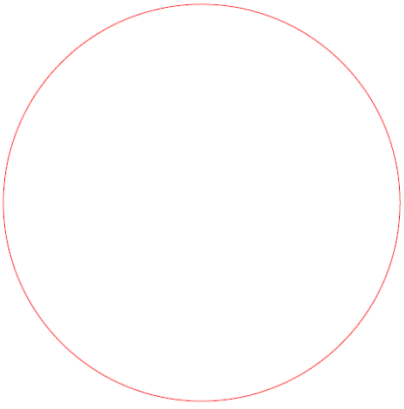


Figure 12 : disque interne coté bouchon (x2)

ASSEMBLAGE

L'assemblage d'instrument se réalise en plusieurs étapes :

1-Commande des pièces

- Il faut disposer en stock de toute les pièces nécessaires au projet. Donc tous les composants électroniques et mécaniques tel que disponible en annexes de ce document. 7
- Faire imprimer le PCB (carte mère chez un fournisseur de PCB). Les délais de fabrications sont cours (7 à 15j) en générale.
- Fabriquer ou faire fabriquer les pièces pour le boitier, à savoir le tube en PVC et les bouchons en PMMA ou PVC. Pour cela on utilise les plan 2D des bouchons que l'on fera découper sur découpeuse laser ou jet d'eau. Une fraiseuse numérique peut convenir à condition de disposer de fraise adéquates (c'est au fournisseur disposant de la fraiseuse de vérifier avec les plans en mains).

Outils nécessaires : *Découpeuse laser, jet d'eau ou fraiseuse.*

2-Réalisation du boitier

- Une fois toutes les pièces du boitier découpé, il reste un travail de préparation à réaliser, tel que perçage, taraudage de pas de vis, et réalisation de chanfrein.
- On assemble ensuite les différentes parties du boitier avec les capteurs et les joints, mais sans l'électronique.
- On ferme ensuite le boitier (tube, bouchon 1, et bouchon 2 avec capteurs) sans électronique afin de le plonger 1 nuit dans l'eau à au moins 10m de fond pour tester l'étanchéité. S'il n'y a pas d'eau dans l'instrument on peut procéder à la suite.

Outils nécessaires : *perceuse, jeux de taraud, affleureuse (ou défonceuse, ou perceuse colonne).*

3-Réalisation de la partie électronique

- La 1ère étape consiste à réaliser les soudures de tous les câbles, puis de tous les composants sur la carte mère (PCB).
- On fixe ensuite la carte mère, carte d'alimentation, batterie et écran sur la plaque de support central.
- On connecte tous les composants ensemble (câblage)

Outils nécessaires *: fer à souder, voltmètre.*

4-Installation logiciel et configuration préalable

- Il faut d'abord vérifier et configurer chaque composant individuellement, tel que mise à jour d'horloge, étalonnage de certains capteurs, vérifier les informations délivrées, etc.
- Ensuite on formate la carte SD avec tous les fichiers nécessaires
- Pour finir in installe le logiciel dans le microcontrôleur de l'instrument (ESP32)
- Un test final permet de vérifier que tout fonctionne

Outils nécessaires *: ordinateur, lecteur de carte mini-SD, et câble USB pour se connecter à l'instrument*

UTILISATION ET ENTRETIEN

Une fois construit et assembler l'instrument est assez simple à utiliser, un mode d'emploi joint à se document en explique le détail.

Fonctionnement

L'instrument et en particulier son logiciel interne est prévu pour fonction de la manière suivante :

1. **Allumage - Initialisation** :
   1.1. Ouverture de l'alimentation du microcontrôleur et de tous les composants
   1.2. Séquence d'initialisation de test de tous les composants
   1.3. Création du fichier d'enregistrement des données
   1.4. Affichage de la situation (écran + LED + musique)
   1.5. Mise en veille de l'instrument
2. **Série de mesure** : Une fois la séquence d'initialisation réalisée, l'instrument passera dans une boucle durant laquelle il alternera entre séquence de mesure et mise en veille selon les cycles suivants
   2.1. Réveil, et allumage des capteurs
   2.2. Pause pour laisser les capteurs chauffer
   2.3. Réalisation des séquences de mesures selon la configuration choisit (c'est combien de mesure il réalise par cycle)
   2.4. Enregistrement des mesures sur la carte SD
   2.5. Extinction des capteurs (on coupe l'alimentation de tous les capteurs)
   2.6. Mise en veille du microcontrôleur durant la durée choisit lors de la configuration

Il est à noter que le microcontrôleur ne s'éteint jamais, à chaque veille il se met en mode de consommation minimale. Par contre tous les capteurs et autres composant électronique voit leur alimentation couper pendant la veille pour économiser le maximum d'énergie. La carte d'alimentation (interface entre les batteries et le microcontrôleur) ne peut donc jamais être éteinte, sauf lorsqu'on éteint l'instrument (on/off), auquel au prochain allumage il recommence la séquence entière.

Utilisation

Pour utiliser l'instrument il faut :

1. Configurer l'instrument, c'est-à-dire ouvrir le fichier config.txt qui se trouve sur la carte SD (simplement en retirant la carte SD de l'instrument et en la plaçant dans un ordinateur) et indiquer :
   a. La durée de mise en veille
   b. Le nombre de mesure identique à réaliser à chaque séquence
2. Remettre la carte SD dans l'instrument
3. S'assurer que les batteries sont chargées et refermer l'instrument en s'assurant d'un serrage ferme et homogène sur les 3 tiges serrages (ce point est très important pour assurer l'étanchéité, la meme pression doit être réaliser sur les 3 tiges).
4. Mettre l'instrument sur on et le déployer sur la zone souhaitée.

Pour récupérer l'instrument et les données, il faut :

1. Sortie l'instrument de l'eau, le rincer à l'eau douce, le faire sécher
2. Le mettre sur OFF
3. Ouvrir l'instrument et récupérer la carte SD
4. Placer la carte SD sur un ordinateur et récupérer le fichier de donnée datalog.txt

Entretien

Il convient de rincer l'instrument à l'eau douce, de ne pas frotter les capteurs avec une brosse métallique ou autre outils décapant.

Charger régulièrement les batteries.

Eventuellement changer les composants défectueux.

Vider régulièrement le fichier de donnée datalog.txt

Etalonnage

Le fluorimètre Turner

Le fluorimètre est livré étalonné avec un certificat d'étalonnage fourni par le constructeur, il n'y a donc pas d'étalonnage à réaliser à la création de l'instrument.

Au fil du temps si une dérive se fait sentir, il est possible d'appliquer une correction aux données. Le centre d'Ifremer dispose de solution et d'instrument d'étalonnage en chlorophylle. On pourra alors utiliser leur instrument et procédure pour trouver le facteur correctif à appliquer.

Les capteurs Blue Robotics Bar100 et Fast Temp

Comme pour le fluorimètre, ces capteurs sont livrés étalonnés par le constructeur, et sont peu sujet à dérive. Dans le cas contraire, un thermomètre de laboratoire de référence peut être utile pour mesure une éventuelle correction à appliquer.

Le capteur de conductivité Atlas

Ce capteur est livré avec des solutions de calibrations, il faudra donc étalonner manuellement ce capteur à l'aide de ces solutions. La procédure est fournie par le constructeur et bien documenté, il faudra s'y référer pour réaliser cette opération (décrite également dans le manuel et le tuto wikifactory).

CONSTRUCTION ET ENTRETIEN LOCAL

LES MOYENS LOCAUX DRM ET IFREMER

Les salles instrumentales de la DRM sont situées sur le centre de recherche Ifremer, avec ces deux organismes au même endroit on dispose de tout le nécessaire pour construire et entretenir les instruments.

Pour l'assemblage des composants et des pièces fabriquer il faut disposer d'un certain nombre d'outils et de machine adapté.

Outils pour l'électronique :

- Fer à souder + outils et nécessaire à soudure
- Voltmètre pour tester les composants
- Chargeur de batterie

Figure 13 : Salle atelier de la DRM

Outils d'atelier :

- Petit outillage d'atelier, tournevis, pince, clef à molette, scie…etc…
- Affleureuse avec fraise adapté
- Perceuse
- Jeux de taraud

Espace de travail :

- Paillasse avec courant 220v
- Accès à l'eau
- Stockage propre abrité de l'humidité ou des grosses chaleurs ou du gel.
-

Figure 14 : construction des instruments dans la salle atelier DRM

Le local de la DRM permet de recevoir tout ces outils et dispose de paillasse, point d'eau, d'une salle climatisée. Dans cet atelier est également présent du petit outillage d'atelier.

Pour les besoins du projet, on a dû acheter et équiper la salle de matériel électronique, on a ainsi équipé la salle atelier de la DRM de station de soudage, d'équiper et petits outils liés à la soudure, d'un bon voltmètre, et pour la partie mécanique d'une affleureuse et des fraises adaptées.

Seule la perceuse électrique portative est manquante, mais plusieurs sont disponible dans les ateliers Ifremer, et il ne pose donc aucun souci de pouvoir s'en procurer.

Sur site il y a également un des machines d'atelier comme une perceuse colonne qui peut être pratique et être utilisé pour le projet.

RESSOURCES POUR CONSTRUCTION ET ENTRETIEN

Pour la construction des instruments il y a plusieurs choses à réaliser :

1. Pièce électronique à commander à l'étranger (Capteur spécifique)
2. Matériaux et fourniture diverse à trouver localement (petit composant électronique, visserie, câble, tube PVC,etc…)
3. Pièce à fabriquer ou faire fabriquer localement (bouchon des capteurs)

Commande spécifique (1)

Pour le point 1 : les pièces commandées à l'étranger, il y a des frais de taxe douanière estimé autour de 30% pour les objets provenant d'Europe et de 40% pour les autres pays.

Au vus des tarifs douaniers nous conseillons des achats depuis l'Europe.

Achat fourniture (2)

Pour le point 2 : les fournitures sont achetées dans magasin sur Tahiti et en particulier :

- ElectroSAV, à Papeete pour les fournitures électroniques,
- Outils d'atelier et matériaux : ACE à Taravao, ou Hyper Brico à Papeete
- VBP : Visserie Boulonnerie Polynésienne : Toutes visseries

Fabrication bouchon (3)

Pour fabriquer les bouchons du boitier des instruments il faut pouvoir disposer d'une découpeuse laser ou équivalent. Il n'existe pas de machine équivalente sur le centre Ifremer ou dans les locaux de la DRM. Il faut donc passer par un prestataire local pour cette partie.

Nous n'avons pas trouvé de découpeuse laser disponible pour nos besoins, mais certains acteurs disposent d'une découpeuse jet d'eau, et d'autre de fraiseuse à commande numérique. Ces deux types de machine peuvent réaliser un travail équivalent, ou en tout cas suffisant pour nos besoins.

Nous avons contacté plusieurs prestaires et avons retenu ceux qui était capable de fournir un service de découpe et nous leur avons demandé un devis. Certain n'ont pas pu fournir de devis ou répondre à nos sollicitations dans la durée de la mission, mais voici les résultats de nos recherches :

Type de machine	Entreprise	Contact	Fournit matériau	Tarif	Commentaire
Fraiseuse numérique	Matuvuu Tahiti	contact@matuvu.pf 40 54 13 52 https://www.matuvu-tahiti.com/	oui	60 990 XPF pour 1m² (15 instruments) **Soit 4 066 XPF par instrument**	Entreprise de panneau publicitaire, qui accepterai ce genre de découpe. Contact facile et semble opérationnel rapidement.
Jet d'eau	H2VH Polynésie	87 33 33 38 h2vhpolynesie@outlook.fr	non	147 728XPF pour 19 ensembles, soit **7775XPF par instrument**	Structure idéale pour réaliser ça. Artisan fait pour ça, très pro.
Jet d'eau	Technimarine	operation@technimarine.pf 40 43 02 22 https://www.technimarine.pf/	non	Pas de réponse	A priori idéal, car très pro et service de découpe dédié pour plaisance, entreprise et particulier.
Jet d'eau	Inov Inox	inovinoxpf@gmail.com 40 82 49 50 https://inov-inox.business.site/	non	Pas abouti	Bon contact, mais le projet lui semblait trop différent des projets habituels, et préfère des plus grosses commandes.

Autre piste sérieuse à contact : l'entreprise Fenua Gravia (https://www.facebook.com/fenuagravia) réalise des découpes sur bois. Au vu des produit vendu il doit s'agit d'une découpeuse laser. Nous avons découvert leur produit en toute fin de mission par hasard à Moorea avant de prendre l'avion, et il pourrait être utile de négocier avec eux pour leur faire produire nos bouchons à la découpeuse laser (si leur découpeuse est assez performante).

Il a fallu aussi trouver les matériaux à fournit au prestataire de découpe. Tous les prix ci-dessous sont pour des plaques de 10mm d'épaisseur.

Entreprise	Matériaux	Tarif découpe au m²	Commentaire
Matuvuu Tahiti	PVC blanc	13 125 XPF	
Matuvuu Tahiti	Plexiglass	25 109 XPF	
SPM	PVC blanc	16 000 XPF	
Hervé Matériaux	PVC blanc	9 070 XPF	En plaque de 3m x 1.25m donc 34 000 XPF la plaque
Faa'a matériaux	PVC	14 342 XPF	en plaque de 1.22x2.54m à 44450Xpf la plaque

ESTIMATION COUT DE PRODUCTION

La seule chose qui sera à produire localement sera le boitier en PVC/Plexiglass, qui sera réalisé en découpe laser, Jet d'eau ou par une fraiseuse numérique pour la partie bouchon, et le tube en PVC qu'il suffira d'acheter et couper à la bonne dimension.

La plupart des composants électroniques de base (résistance, interrupteur, etc…) et des fournitures mécaniques (visserie, écrou…) peuvent se trouver dans les magasins sur Tahiti mentionné ci-dessus, ou peuvent être commandé par eux.

Il faudra enfin commander à l'extérieur de Polynésie, les composants spécifiques. Cela concerne ca carte électrotonique sur laquelle on soude les composants, et les capteurs (fluorimétrie, température, pression, etc…).

Le tableau en annexe 2, détaille le coût et fournisseur pour chaque composant avec des fournisseurs sur Tahiti et d'autre à l'étranger (Europe et ailleurs).

On peut retenir que coût d'achat des composant pour un instrument est 6245 € (TTC, incluant douane pour les commandes extérieures, mais hors frais de livraison). Le plus gros du prix est alloué au capteur de chlorophylle Turner qui à lui seul coûte 5238€. C'est malheureusement nécessaire pour la précision demandée en lagon. Il faut noter qu'en début de projet, le coût de se capteurs avoisinait les 2500€ pièce, avec la pénurie de composant et l'augmentation des prix par suite des crises post-covid, certain coût comme celui-ci ont été fortement revu à la hausse.

La répartition de prix des composants est la suivante :

Partie de l'instrument	Coût	% du prix total
Instrument complet	**6245 €**	**100 %**
Instrument complet sans le capteur Turner	*1006 €*	*16 %*
Total capteur	5772 €	92%
Total capteurs (hors Turner)	*534 €*	*9%*
Total électronique (datalog)	291 €	5%
Total Boitier	181 €	3%

On peut voir que la création d'un instrument multi-paramètre en lui-même n'est pas excessive. C'est le capteur de fluorescence qui est très cher et qui constituera un vrai levier de développement pour la suite du projet.

Il faudra démarrer un nouveau travail de recherche sur le développement de la partie capteur de fluorescence en elle-même pour pouvoir diminuer significativement les coûts.

EXPERIMENTATION PRELINAIRE ; PROJET OBS SALOUM

OBS-SALOUM – ESSAI PRELIMINAIRE AU SENEGAL

Le projet ObSaloum

Des instruments ont été déployé sur le terrain au Sénégal dans le delta du Saloum (en collaboration avec le projet ObsSaloum : Projet qui vise à comprendre pourquoi les retours de pêche diminuent dans ce delta en déployant des sondes multi paramètres).

Dans ce cas précis il s'agit d'instrument en zone Intertidal. L'instrument est au sec à marée basse et immergé à marée haute.

Un panneau solaire permet d'alimenter le système en continu. Pour des mesures de longue durée. Dans ces conditions particulières il n'y a pas de problème d'approvisionnement en énergie ou d'autonomie de la sonde.

Le fouling est tout de même très présent dans ces zones.

Résultats

Les instruments on parfaitement fonctionné sur les points de déploiement dans le delta. Les mesures de fluorimétrie sont fiables ainsi que la température et la pression. Il y a une dérive observée sur la conductimétrie mais dont l'explication est compliquée car l'instrument a été retrouvé avec un dépôt de sédiment dans la zone concerné (zone fortement chargée en sédiments qui se dépose dans la cellule).

Dans le Saloum l'instrument était fortement sollicité en quantité de mesure et donc allumé tout le temps. C'est pourquoi un panneau solaire est installé, cela permet de ne pas se préoccuper de l'autonomie énergétique.
Dans le cadre du projet OpenLagon il faudra paramétrer l'instrument pour faires des mesures plus espacées et ajouter des batteries pour gagner en autonomie.

Figure 15 : Déploiement en zone intertidale sur piquet avec alimentation par panneau solaire

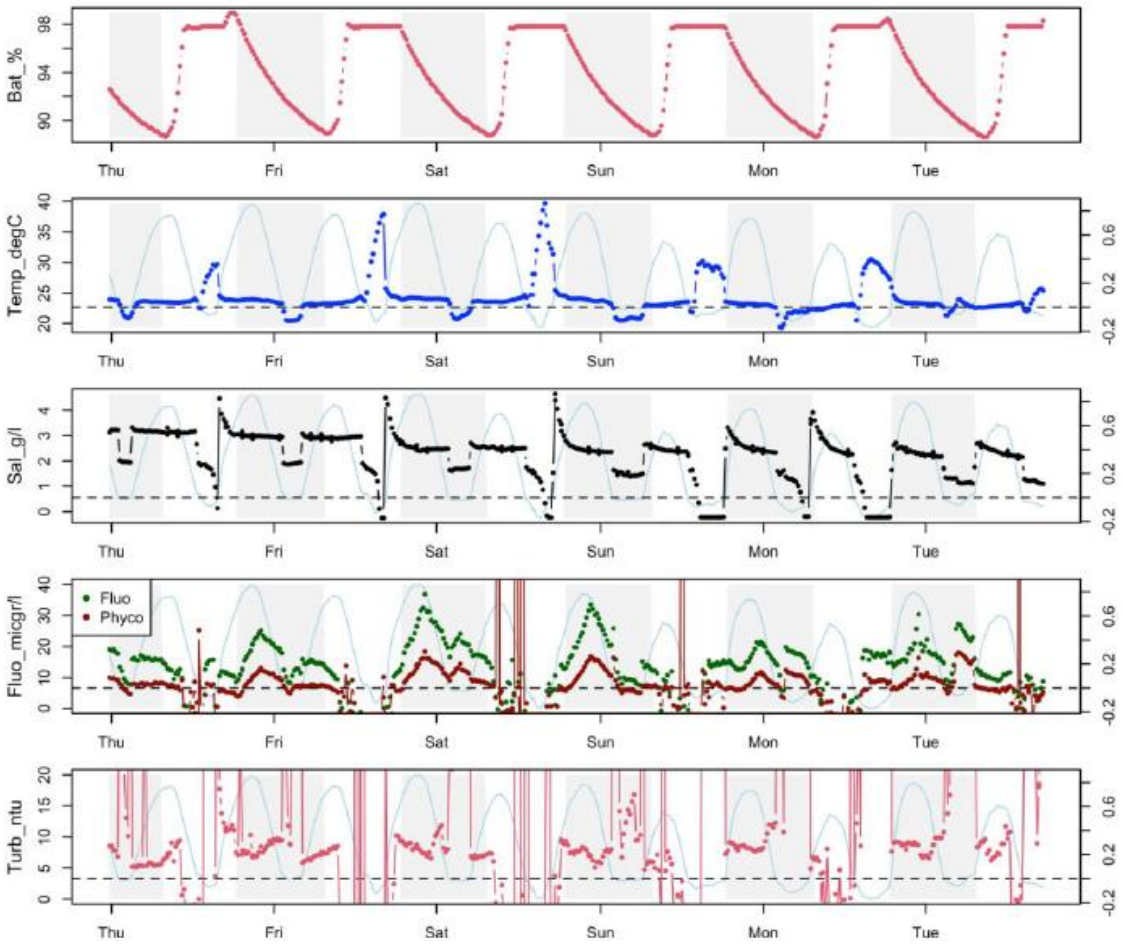


Figure 16 : exemple de résultats montrant l'évolution des paramètres en fonction des marées

EXPERIMENTATION OPEN-LAGOON

Open Lagoon : zone de déploiement

Dans le cadre du projet Open Lagoon 2 zones principales ont identifié pour mener nos activités :

- Tahiti, Lagon de Vairao, Station Ifremer : Le centre Ifremer Tahiti où se situent une partie des locaux de la DRM, constitue le centre principal du projet. C'est là que sont assemblé les instruments et que sont analyser les données. C'est aussi là que seront formés les personnes concernées. C'est aussi dans le lagon de Vairao en face du centre Ifremer que sont réaliser les 1ers tests et les configurations des instruments.
- L'atoll d'Ahe, le lagon et la ferme perlicole de Maeva Wan : C'est dans l'atoll d'Ahe avec la participation des membres de la ferme perlicole de Maeva Wa, que sera réaliser la mission de validation In-situ des instruments.

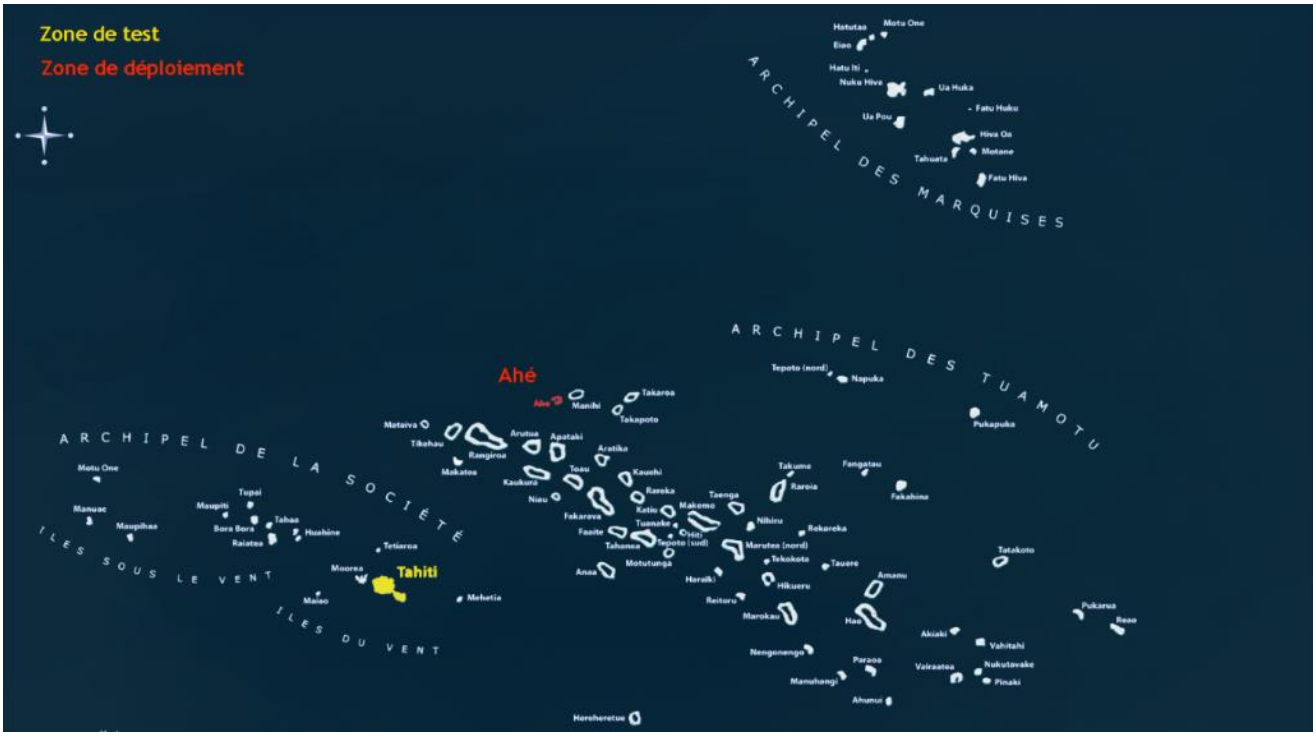


Figure 17: Carte des zones de travail

TAHITI – LAGON VAIRAO – TEST FLUORIMETRE

Figure 18: Carte des emplacements de test au lagon Vairao devant la station Ifremer

Figure 19: Emplacement déploiement pour la comparaison OSO/Sambat

Les instruments sont assemblés et configurer dans l'atelier de la DRM au sein du centre Ifremer, c'est également là que nous avons opéré nos 1ers essais.

Test étanchéité

Pour tester l'étanchéité, nous avons réalisé des boitiers avec capteurs mais sans la partie électronique intérieur. Ainsi si le boitier venait à prendre l'eau, il n'y aurait pas de batterie ni d'électronique qui risquerai d'être court-circuité par l'eau de mer.

On a essayé 4 boitiers, que l'on a plongé à l'aide de poids jusqu'à 12m de profondeur depuis le ponton du centre. On laisse une nuit et on remonte les instruments le lendemain pour vérifier l'étanchéité. Et on a répété l'opération plusieurs fois.

Il n'est pas apparu de problèmes particulier, l'intérieur des boitiers était toujours sec. La conception est bien étanche sur ces profondeurs (on s'attend à déployer entre 5 et 10m de profondeur dans les fermes perlières).

Le seul point d'attention porte sur le serrage homogène et ferme des tiges de compression. Un des boitiers ou le serrage n'était ni homogène ni suffisant à pris un peu d'eau 1 fois.

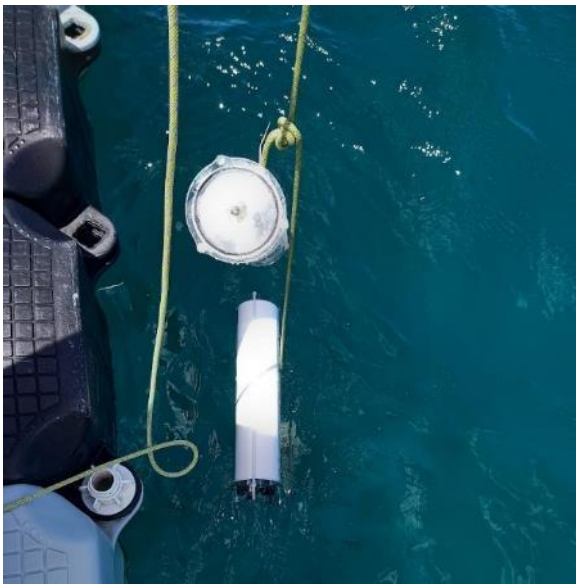


Figure 20 : mise à l'eau des boitiers pour test étanchéité

Inter-comparaison

Afin de valider le comportement de nos nouveaux instruments de mesures, nous réalisé une comparaison entre un instrument déjà en place dans le lagon et notre instrument. Cela permet de vérifier le comportement de nos capteurs et de l'enregistrement des données avant envoi en mission in-situ sur Ahe.

Dans le lagon, le DRM dispose d'un instrument NKE Sambat qui servira donc d'instrument de référence. Ces instruments sont équipés d'un capteur Turner en chlorophylle tout comme nos instruments OSO.

Figure 21 : Exemple d'installation de sonde OSO avec une sonde Nke Sambat

Résultat en température

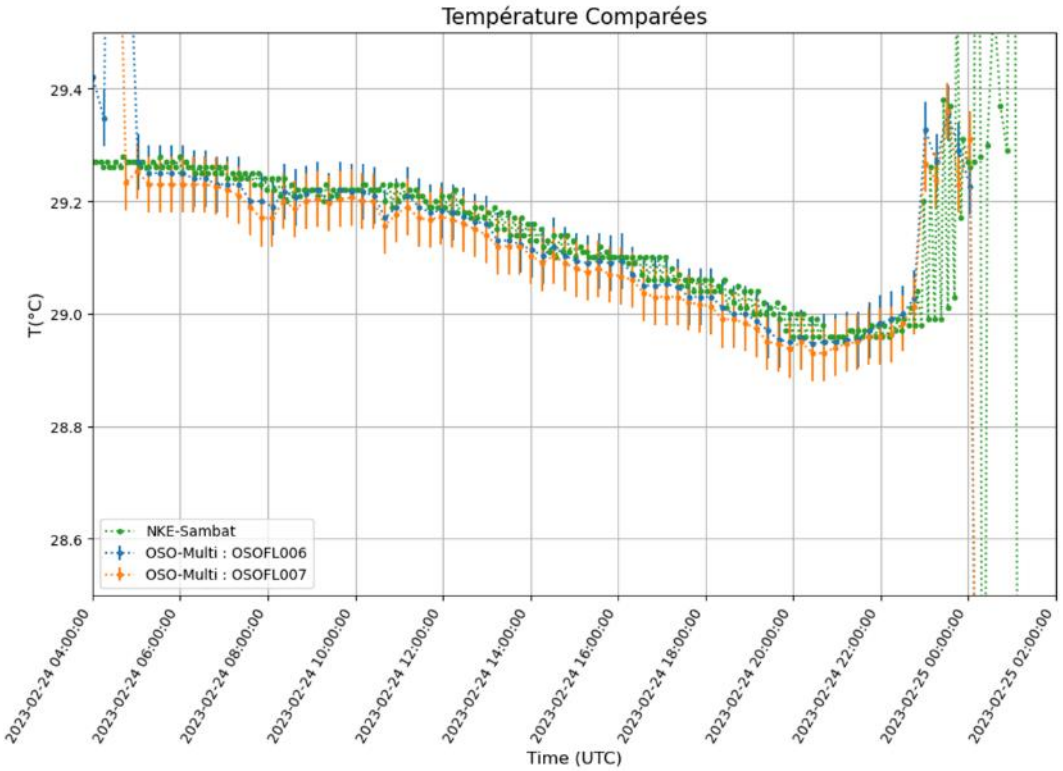


Figure 22 : comparaison température, NKE, OSOFL006 et 007 - Tahiti-Vairao

Les trois capteurs de température donnent des résultats comparables. Les deux capteur OSO ont leur valeur et marges d'erreur dans la plage du capteur de référence (NKE). Donc les capteurs donnent de bonnes valeurs et sont correctement étalonné.

Résultat en pression

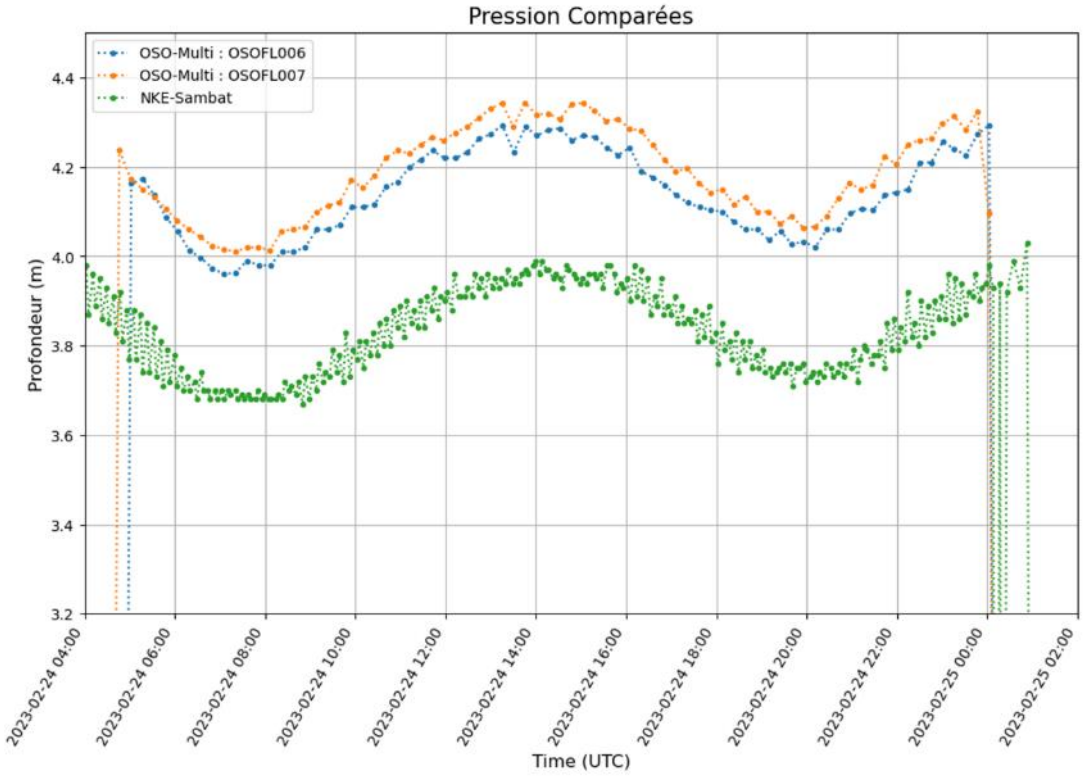


Figure 23 : comparaison pression, NKE, OSOFL006 et 007 - Tahiti-Vairao

Le capteur de pression NKE n'était pas étalonné (d'où le décalage).
Les deux capteurs ont des comportements identiques et des variations relatives identique au capteur de référence, signe de fiabilité d'utilisation.

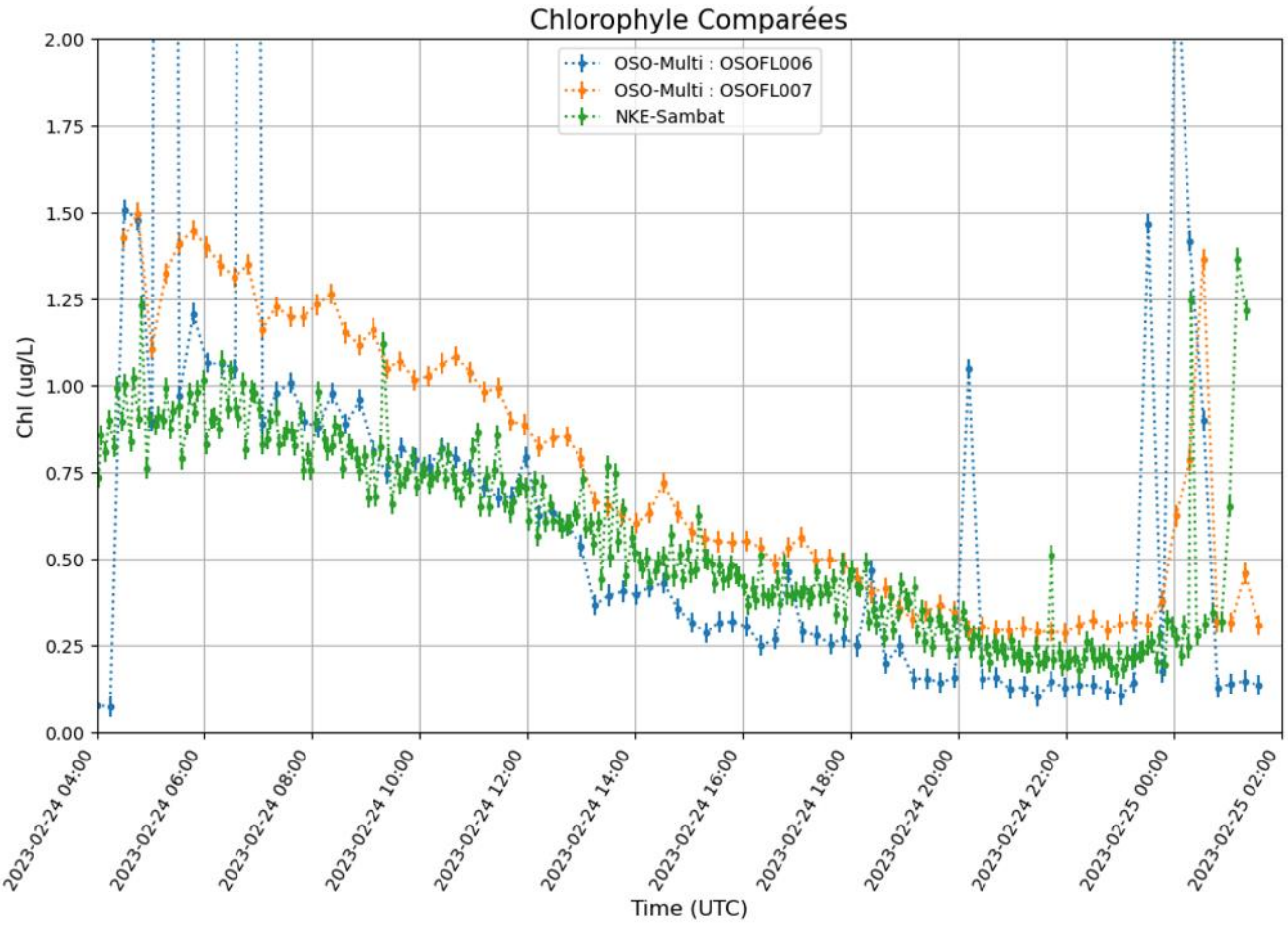


Figure 24 : Comparaison chlorophylle, NKE/OSOFL006/OSOFL007- Tahiti - Vairao

Les capteurs de chlorophylle sont étalonnés par le constructeur et livré avec certificat d'étalonnage et de ne nécessite normalement pas d'étalonnage à la 1ere installation.

Dans les deux sondes, sont présent des capteurs Turner.

On peut en effet voir que les variations absolues et relatives de des deux capteurs Turner vis-à-vis du capteur de référence sont comparable, signe de capteur délivrant immédiatement dès l'installation de bonnes données en particulier pour le capteur OSO006.

Toutefois on observe un décalage notable de 0.2 µg/L entre les deux capteur Turner, alors qu'ils sont censés être livré étalonné. Il s'agit juste d'un offset, mais il semble utile de le vérifier et d'en tenir compte dans les mesures lors de l'installation des capteurs Turner dans un instrument OSO. Cette réflexion est à modéré vis-à-vis du fait que les données ont été acquise en milieu naturel et qu'il peut aussi s'agir d'une différence d'éclairage ou de proximité d'organisme à concentration en chlorophylle différente sur les cordages du mouillage. Les résultats de la mission à Ahe donnent de très bons résultats sur la fiabilité des capteurs Turner vis-à-vis d'une référence sans modification d'étalonnage. Pour vérifier la fiabilité de l'étalonnage des capteurs Turner il faudrait test un grand nombre de capteurs dans des conditions de laboratoires.

OPEN-LAGOON : MISSION DE VALIDATION IN-SITU A AHE

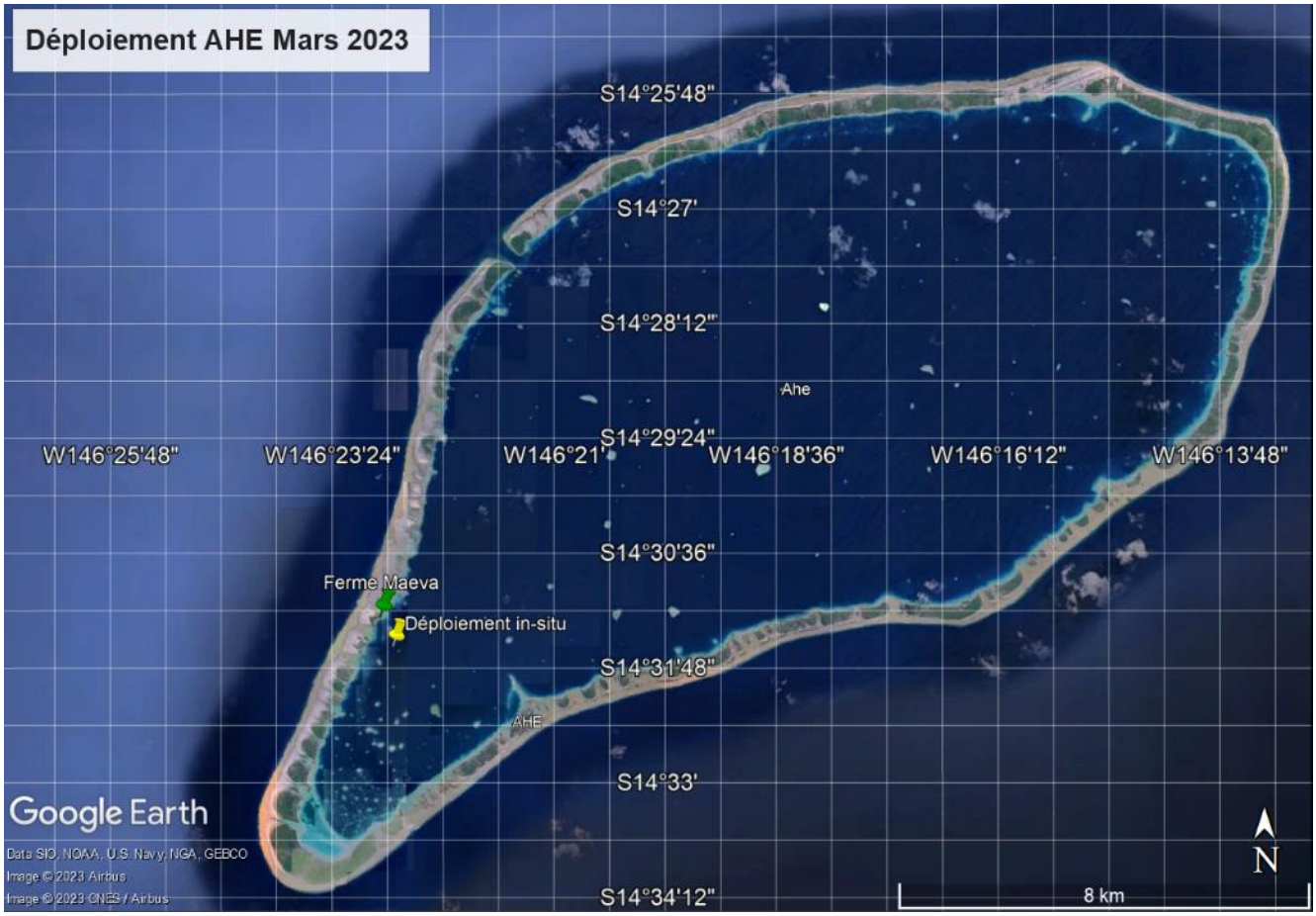
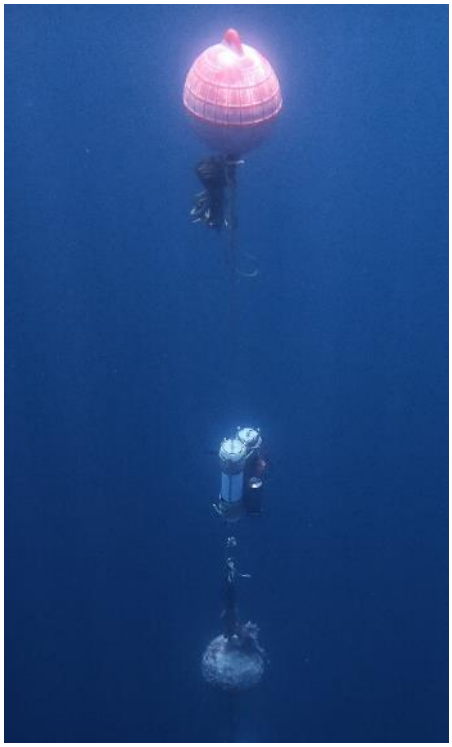


Figure 25: Carte de déploiement de l'instrument OSO dans le lagon de AHE devant la ferme perlière de Maeva Wan

Ahe est un atoll de l'archipel des Tuamotu sur lequel il y a une forte activité perlicole et une activité touristique presqu'inexistante.



Les perliculteurs de cet atoll travaillent depuis longtemps avec le DRM sur divers projets de biodiversité et de pollution du lagon. Une ferme perlière (celle de Maeva Wan) à eu la gentillesse de nous mettre à disposition un mouillage pour réaliser nos mesures.

Nos instruments sont donc fixés à l'une des bouées de mouillage auquel nous avons rajouter une bouée de flottabilité de sorte à tendre une ligne sur laquelle sont accroché nos instruments.

Figure 26 : ligne de mouillage pour déployer nos fluorimètres

Pour notre mission à Ahe nous avons utilisé 4 fluorimètres :

- JFE-Ref : Un instrument de référence JFE-infiity
- OSOFL007 : Un fluorimètre open source avec capteur Turner
- OSOFL006 : Un fluorimètre open source avec capteur Turner
- OSOFL005 : Un fluorimètre open source avec capteur Trilux.

2 opérations ont été réalisées :

1. Un déploiement de courtes durées pour réaliser une comparaison entre plusieurs sondes. Nous voulions tester les performances des deux capteurs de deux marques différentes afin de déterminer lequel nous utiliserions de manière définitive dans nos instruments. Le capteur Turner est théoriquement plus sensible, il est plus petit, mais plus cher que le capteur Trilux. Les deux capteurs communiquer avec le microcontrôleur via le protocole RS232.
2. Un déploiement longue durée pour tester l'autonomie et la résistance mécanique de l'instrument dans le temps. Le but des mesurer l'autonomie réelle sur batterie, et vérifier si le boitier reste bien étanche, ou ne rouille pas. Nous pourrons aussi vérifier l'effet du fouling sur les capteurs.

Open Lagoon – Inter comparaison de capteur de fluorimetrie - Ahe

On a comparé 3 sondes :

- JFE-Infinity : elle sert de témoin ou sonde de référence
- OSOFL006 : une des deux sondes à tester avec un capteur Turne C-Fluor
- OSOFL005 : une des deux sondes à tester avec un capteur Trilux

Ces 3 sondes ont été attaché ensemble à la manière d'une rosette et ont été déployées sur le spot de déploiement dans le lagon d'AHE en face de la ferme.

Le déploiement à durée 3 jours, à environ 5 m de profondeur.

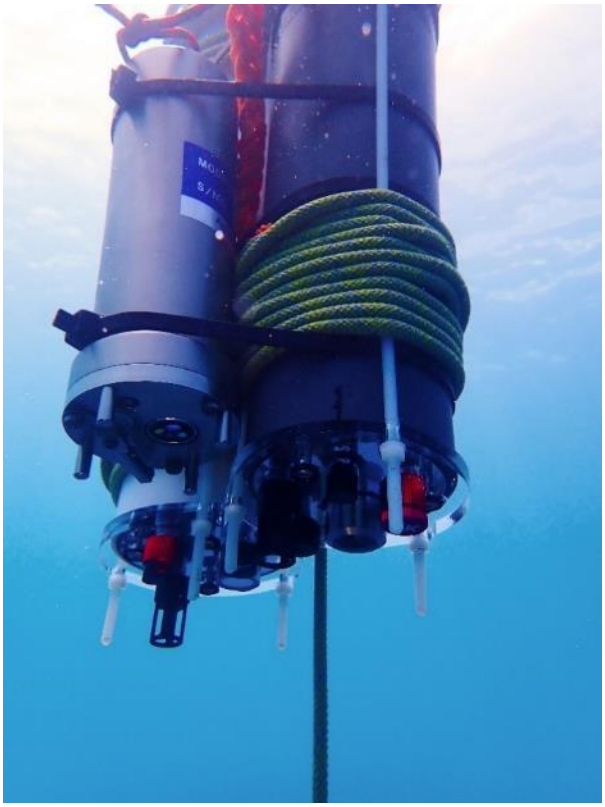


Figure 27 : Rosette avec les 2 instruments à tester et la sonde de référence

Résultat en température

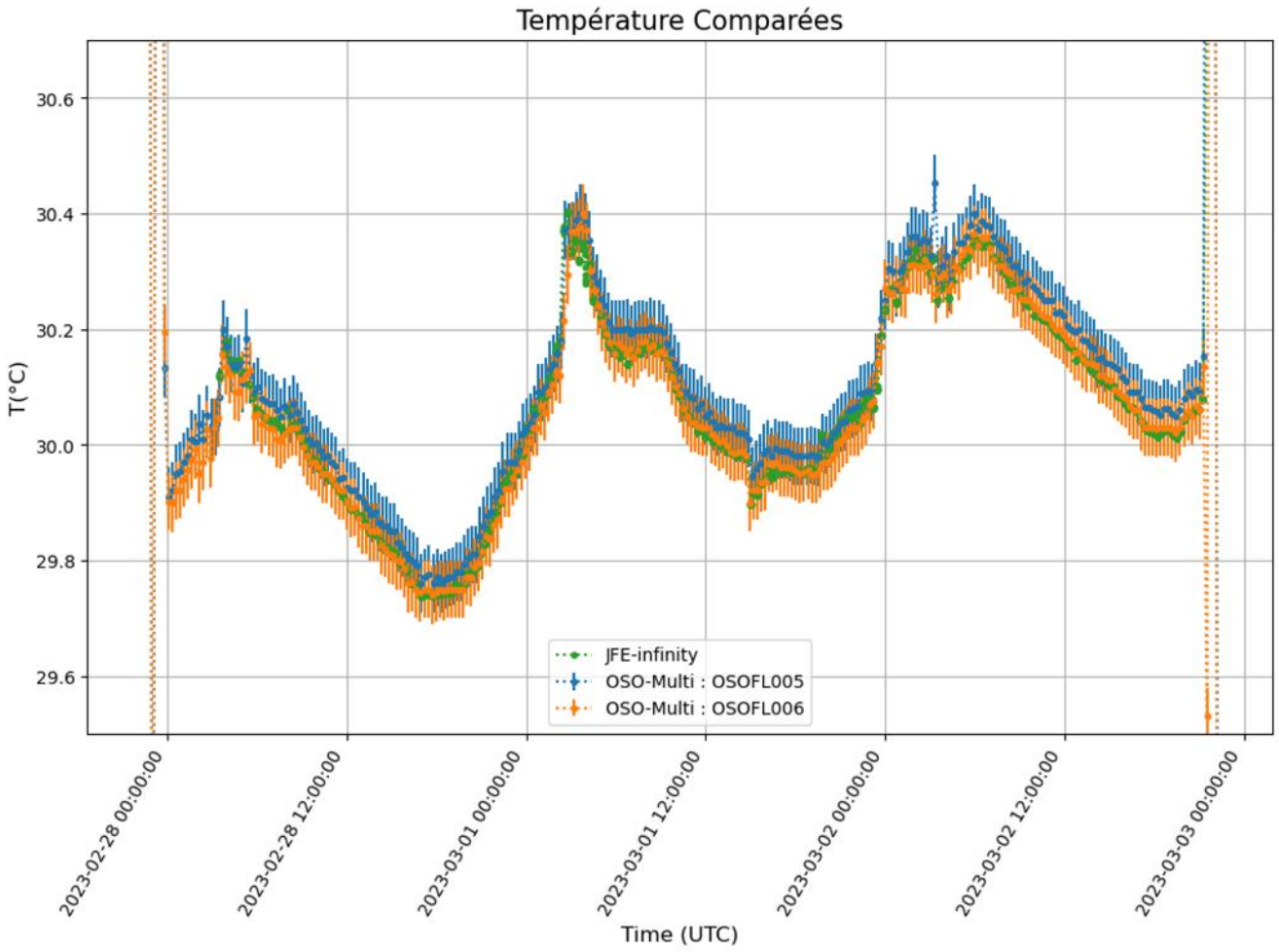


Figure 28 : Comparaison en température JFE, OSOFL005 et 6, Lagon Ahe

Les capteurs de température des trois instruments donnent des résultats tous à fait comparable et dans la marge d'erreur constructeur. Eventuellement un leger étalonnage avec un offset de correction pourrait être appliqué pour des applications à très haute précision de température. Des variations relatives sont dans tout les cas parfaitement identique, signe de fiabilité des capteurs.

Résultat en chlorophylle

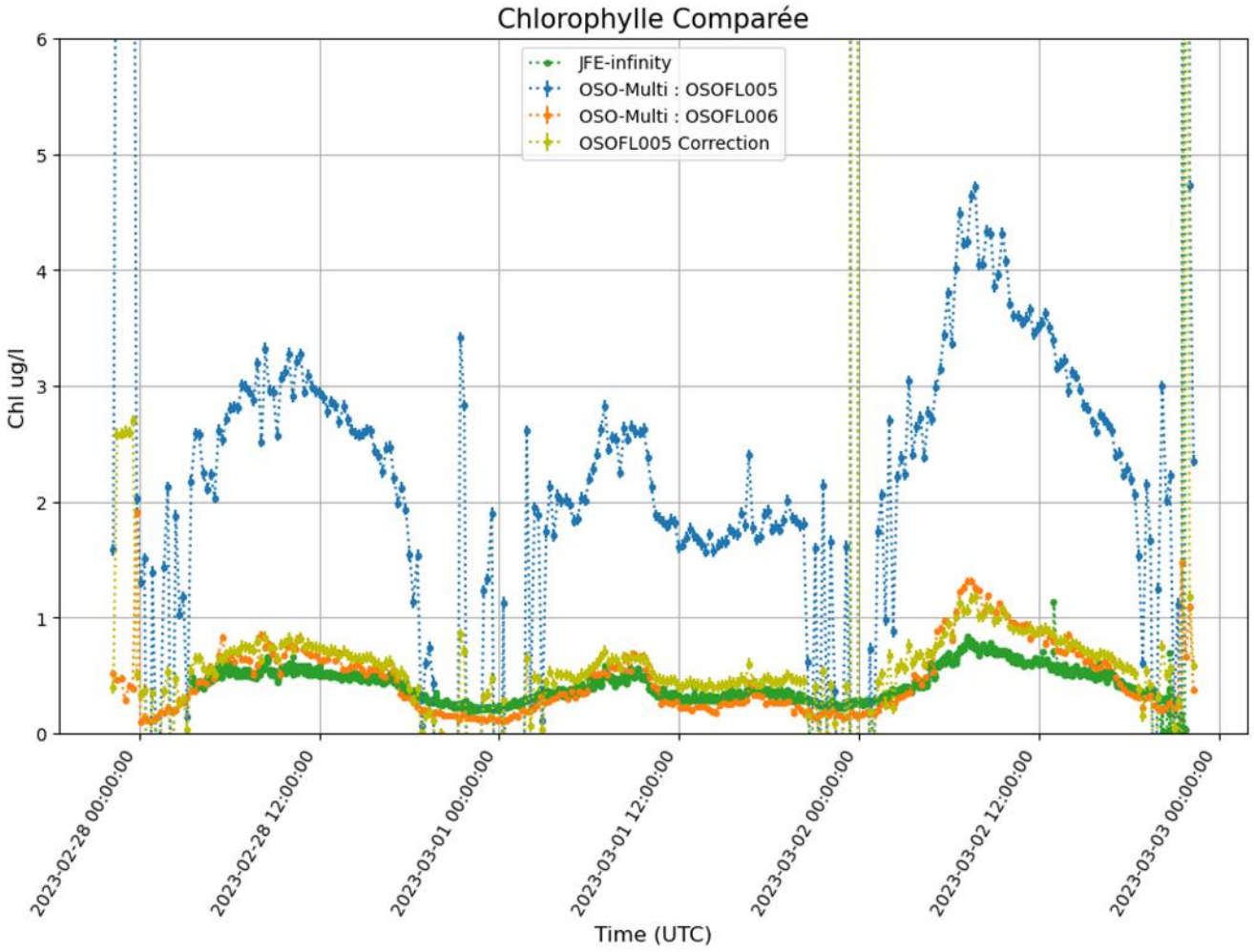


Figure 29 : Comparaison mesure de chlorophylle : JFE, OSOFL005 et 6, Lagon Ahe

Capteur Turner (courbe orange – OSOFL006) :

L'observation des variations de mesure du capteur Turner comparée au capteur JFE, montre des variations relatives similaire, signe que les deux capteurs détectent les mêmes variations de la chlorophylle dans le lagon. On peut toutefois remarquer que l'amplitude des variations du capteur Turner sont légèrement plus importante que celle du capteur JFE alors que la valeurs moyennes des deux est identique. Cela signifie une sensibilité légèrement meilleure du capteur Turner au fluctuation de la quantité de chlorophylle dans l'eau.

Capteur Trilux (OSOFL005 : courbe bleu + courbe jaune) :

Pour ce capteur on peut voir que les valeurs de chlorophylle sont très supérieures aux valeurs de référence, signe qu'un gain à pu être appliqué pour augmenter le pouvoir de détection. Lorsqu'on applique une correction sur un gain de 4x on obtient la courbe jaune présente de variation et valeur absolu proche de la référence.

Mais on peut aussi constater qu'il y a des zone vide autour du 1 mars à 00h00 et du 2 mars à 00h00. Dans ces zones d'après la valeur de référence (JFE) la valeur de chlorophylle descend en dessous du seuil de 0.3 µg/L, des zones pour le capteur Trilux ne capte rien, signe que le seuil de détection (étant supérieur à 0.3 µg/L) n'est pas adapté au milieu aussi oligotrophe que les Lagon.

On peut donc conclure sur la bonne utilisation du capteur turne pour les eaux lagonaires.

OPEN LAGOON – DEPLOIEMENT LONGUE DUREE – LAGON AHE

Pour ce déploiement nous avons installé la sonde OSOFL007 à environ 6m de profondeur sur l'un des mouillages de la ferme perlière. Cet instrument est resté environ 6 mois dans l'eau, durant lesquels les plongeurs de la ferme sont venu voir régulièrement si tout allait bien, c'est-à-dire vérifier les infiltrations d'eau et nettoyer grossièrement les capteurs.

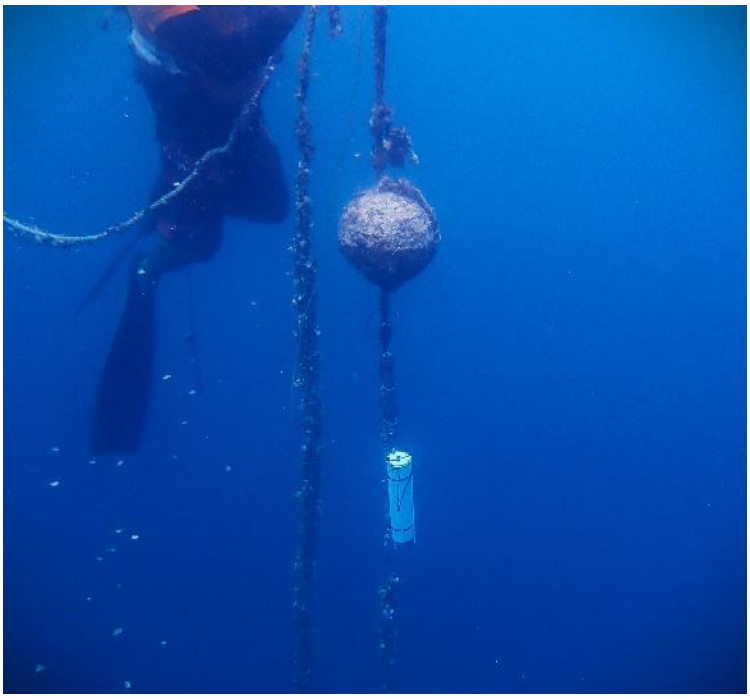


Figure 30 : Installation de l'instrument de mesure (tube blanc) par le plongeur de la ferme sur le mouillage

Résistance mécanique et autonomie

L'instrument a été mis à l'eau le 27 février et sortie le 25 aout. Il s'est écoulé 179 jours soit 5 mois et 26 jours entre ces deux dates.

Durant ce temps il n'a été constaté aucun problème mécanique, pas de fuite d'eau, ni de présence de rouille, ni à l'intérieur, ni à l'extérieur. **Le boitier à correctement remplit les conditions de tenu mécanique**.

La lecture du fichier de données nous renseigne sur l'autonomie des batteries, les données début le 27/02/2023 à 22:37:03 (UTC) et se termine le 01/05/2023 à 13:31:52 (UTC). Cela représente une durée de 62 jours, 14 heures, 54 minutes, 49 secondes, soit **environ 2 mois et 1.5 jours, avec une fréquence de 3 mesures toute les 30mins** avec seulement 6 batteries 18650 de 3400mah.

L'autonomie avait été estimé rapidement à partir de mesure au voltmètre à 3 mois. Les pic d'énergie à l'allumage de la sonde trilux ont certainement impacté et réduit l'autonomie des batteries.

Résultats en température

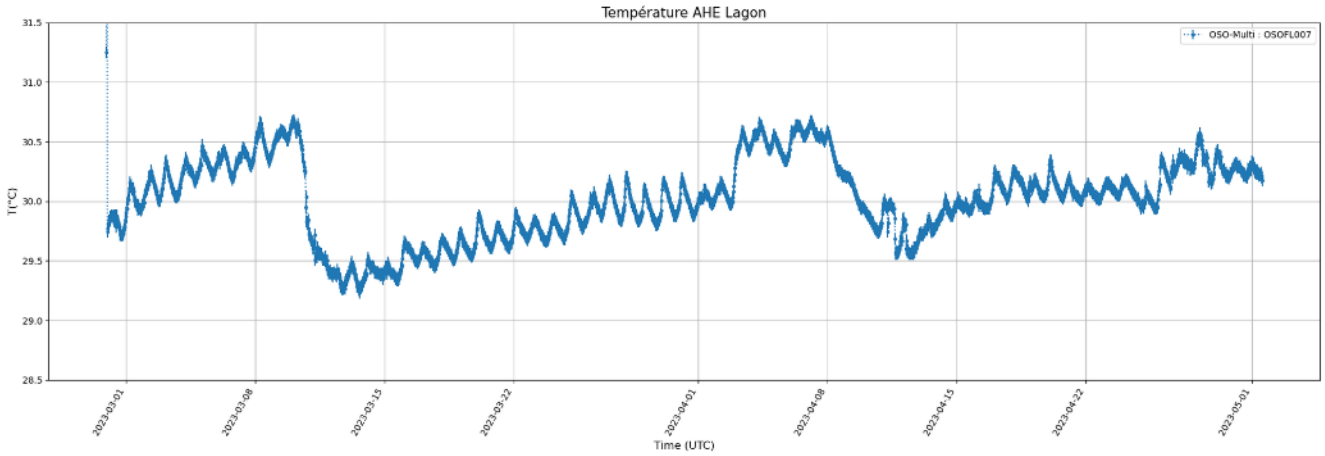


Figure 31 : Variation de température dans le lagon

Le capteur de température n'est pas impacté par la formation de fouling, ce qui est bien visible sur le graphique.
On peut également voir les variations diurnes de température dans le lagon ainsi que les variations à plus grande échelle.

Ces variations grande échelle sont un bon indicateur pour la gestion de l'activité perlicole. La hauteur des lignes pouvant être ajusté en fonction de ces variations. Typiquement lorsque la température augmente, il préférable de descendre les lignes perlicoles pour ne pas être impacté par ce surplus de chaleur.

Résultats en pression

Le capteur de pression n'est pas impacté par la formation du fouling étant donné sa construction et peut donc être immergé en longue durée sans effet sur les mesures. En mesure la pression il nous indique la profondeur à laquelle est immergé la sonde. Comme la sonde est ancrée au sol, cette profondeur va varier en fonction des variations de hauteur d'eau dans le lagon.

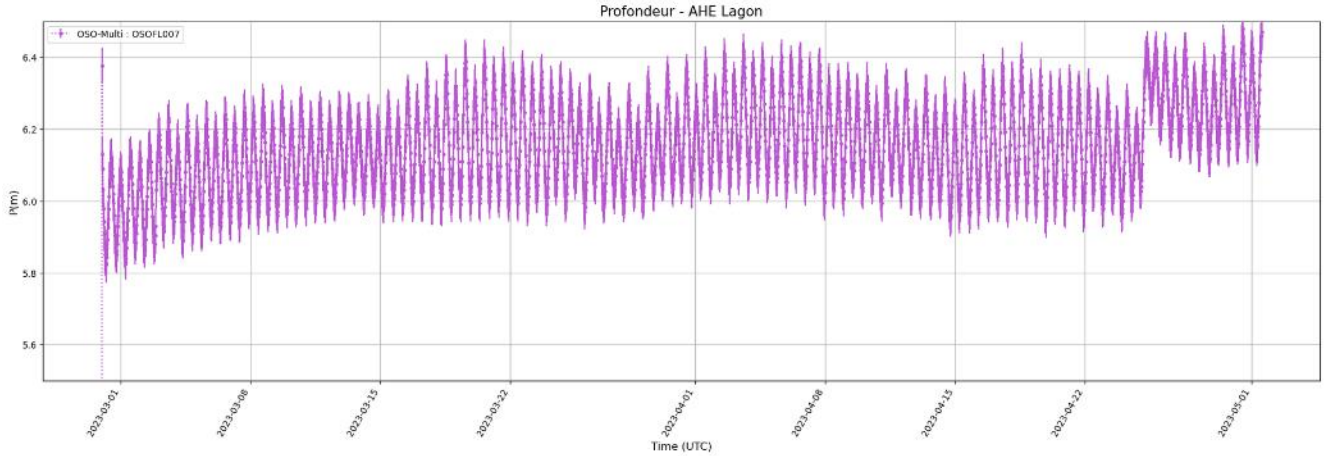


Figure 32 : Variation de le pression (hauteur d'eau) sur la durée d'immersion

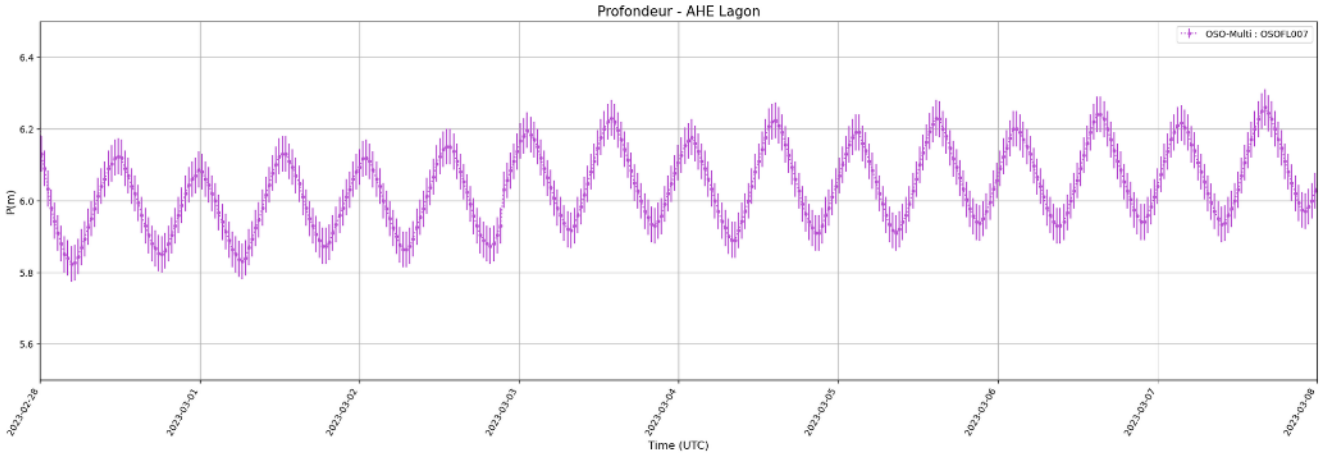


Figure 33 : Zoom des variations de pression sur une durée de 10j.

Ce capteur de pression permet de mettre en évidence les variations de hauteurs d'eau dans lagon en fonction des marées journalières, des intempéries et des grands mouvements de marée.

On peut observer sur les deux graphiques les variations de marée quotidienne et les variations de marée à plus grande échelle.

Résultats en chlorophylle et formation du fouling

Le capteur de fluorescence mesure directement la présence de chlorophylle dans l'eau au niveau du capteur.

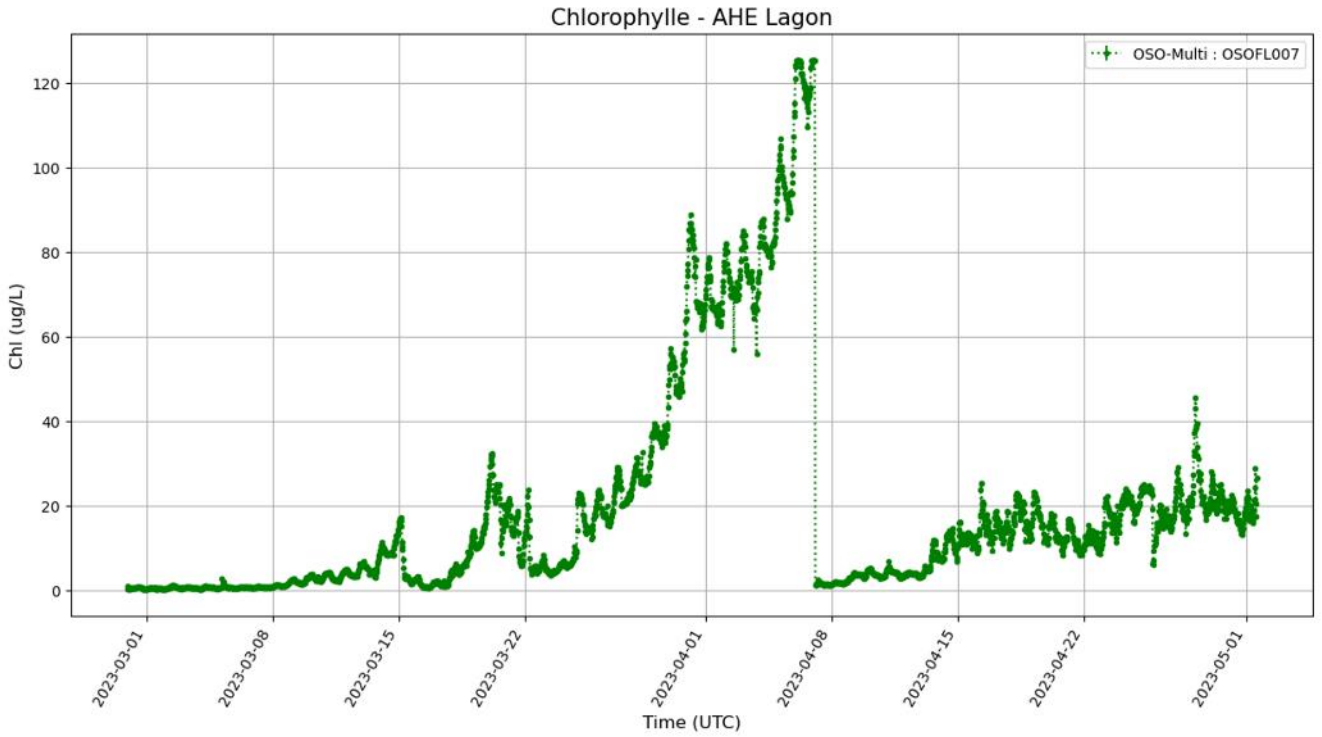


Figure 34 : Variation de chlorophylle au niveau du capteur sur la durée d'immersion

Sur cette courbe on voir de forte augmentation de chlorophylle dû à la présence de biofouling sur le capteur. A certain moment (15 mars, et 7 avril par exemple) que la mesure de chlorophylle chute de manière brusque, correspondant au moment ou le capteur à été nettoyé. Il a été nettoyé dans l'eau par un plongeur qui simplement passer un chiffon sur la surface du capteur.

En observant de plus près les 15 premier jours :

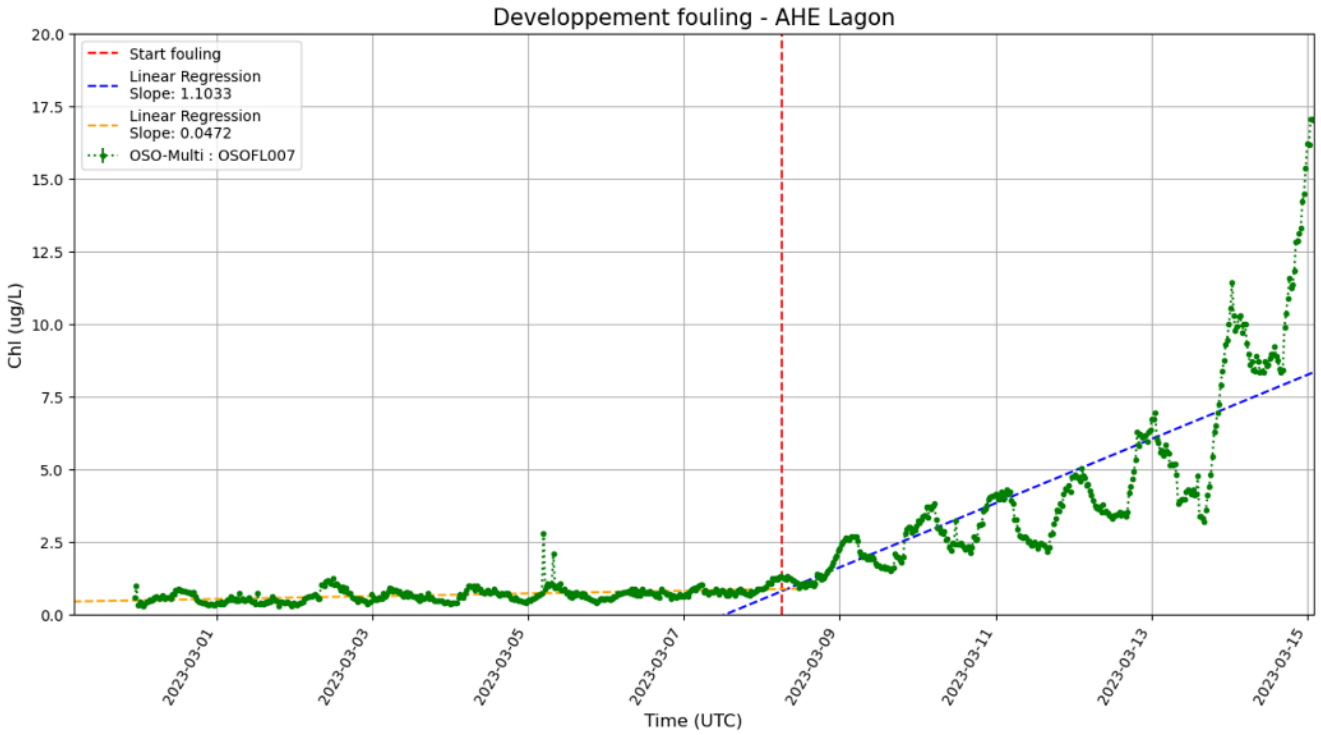


Figure 35 : détail de la mesure de chlorophylle sur les 15 premiers jours. Durée limite avant apparition de fouling.

On peut observer que la mesure de chlorophylle augmente de manière significative après 8.5 de mise à l'eau. Après cette durée les données deviennent difficile utilisable sans un système antifouling.

On peut aussi voir sur la figure 34 qu'après un nettoyage, il ne se passe 8.5j avant que le fouling remonte de manière significative. Par exemple autour du 8 avril, après un nettoyage important, la durée de « bonne mesure » qui suit est beaucoup plus courte qu'après la mise à l'eau initiale.

Cela peut être dû au fait que le fouling se forme en en plusieurs étapes, la 1ière étant la formation d'un microfilm bactérien qui sert de support d'accroche aux autres organismes. Et se biofilm n'est probablement par éliminer par un simple brossage léger.

On peut également voire en détaillant le graphique sur les 8 premiers jour qu'une augmentation légère mais visible apparait sur les mesures.

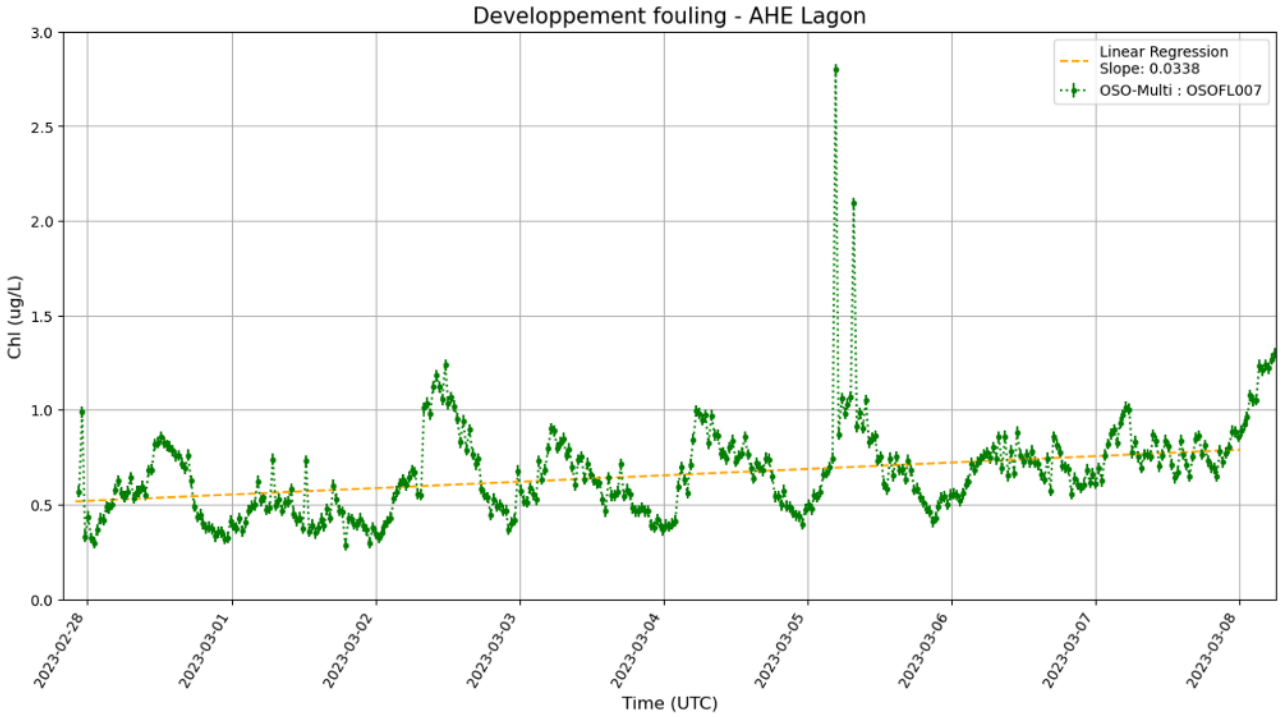


Figure 36 : détail sur les 8 premiers jours. Apparition du biofilm.

Cette augmentation est très légère mais perceptible avec une augmentation de 0.038 µg/L par jour. Cette augmentation apparait à cause de la formation du biofilm qui précède la formation de fouling plus important et impactant sur les mesures.

ANTIFOULING – TEST PROTOTYPE A VAIRAO

Pour limiter la formation de biofouling sur les capteurs il existe des solutions à base balai qui essui régulièrement la surface. Le balai à souvent présenté des limites dans les environnements lagonaires. Une solution à base d'UV qui stérilise la surface en éliminant le biofilm qui sert d'accroche au fouling pourrait être une solution à envisager.

Stérilisation de surface par UVC

Le rayonnement UV est utilisé dans l'industrie pour la stérilisation alimentaire notamment pour l'eau. Il existe différent type de rayonnement UV qui correspondent à des énergies et donc des longueurs d'ondes différentes. Les UVA (315 à 400nm), les UVB (280 à 315nm) et les UVC dont les longueurs d'ondes se situe entre 100 et 280 nm. Les UVC sont les plus énergétiques. Les UVB et UVC étant très énergétiques, ils sont directement absorbés par l'ADN des cellules vivantes et cette absorption induit des réactions qui détruise la structure de l'ADN.

Le rayonnement UV (en particulier UVC) peut donc servir à empêcher la couche de fouling (constitué de bactérie et micro-organisme vivant contenant de l'ADN) de se former en déstabilisant la structure ADN de tout organisme qui se déposerai sur la surface. Cette technique est utilisée pour stériliser les cuves à eau et peut être appliqué pour stériliser la surface de nos capteurs dans l'eau de mer. C'est une technique peu répandue mais prometteuse comme antifouling pour les instruments.

Les UV ont été utilisé pour limiter la production de biofouling en laboratoire, voir l'article de Ryan&Al, 2020 qui montre des résultats très encourageant.

Le protocole

Dans notre étude nous avons voulu tester les performances des UVC en environnement marin lagonaire. Pour cela nous avons utilisé des LED UVC qui éclaire une surface test dans l'eau de mer.

Nous avons choisi les LED UVC d'une longueur d'onde de 275nm et de plusieurs puissance et configuration. 4 LED sont utilisées avec des puissances et des fréquences différentes :

- LED 1 : 4,7 mW - Allumée toutes les 2min pendant 5s
- LED 2 : 4,7 mW - Allumée toutes les 6min pendant 5s
- LED 3 : 13,5 mW - Allumée toutes les 6min pendant 5s
- LED 4 : 21,5 mW - Allumée toutes les 6min pendant 5s

Les LED UVC sont placés autour d'un tube à une profondeur de 4m pendant 10jours. Sur le tube des zone test sont éclairés par les LED et des zones témoins ne sont pas éclairés et donc soumise au fouling. Le tube contient l'instrumentation avec batterie et microcontrôleur pour piloter les LED.

Design instrument

Les LED ont un champ de 120°. La formule : $d = 2h\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)$ nous donne la surface couverte par la LED. Soit environ 7 cm de diamètre avec une hauteur de 2 cm par rapport à la surface du tube. Le capteur ayant un diamètre de 2.7cm, cela est tout à fait suffisant. Et plus on restera près de la surface, et plus le flux sera puissant.

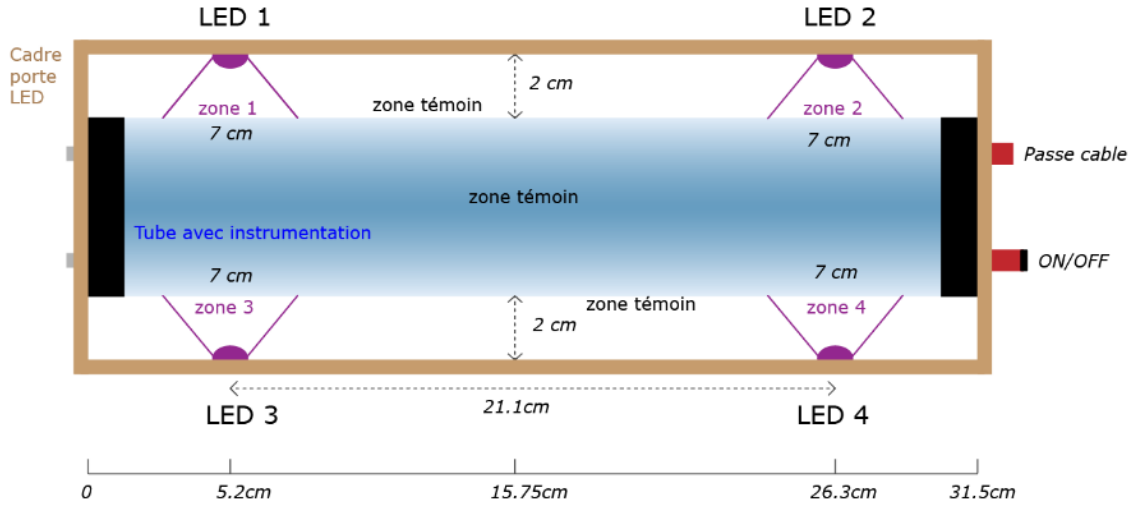


Figure 37: Plan instrument test Antifouling-UVC

L'instrument consiste en un tube dont certaine partie de la surface est éclairés par des LED UVC. La forme tube PVC est choisie car c'est le matériau utilisé pour le corps des instruments de mesure. L'intérieur du tube contient une électronique et des batteries pour piloter l'allumage des LED et leur extinction à intervalle régulier.

Les LED sont fixées sur un cadre en bois qui fait le tour du tube, LED et câbles sont fixé et étanchéifié avec de la résine époxy. La résine époxy n'est pas transparente au UV, il a donc fallu faire attention à ne pas recouvrir la vitre transparente des LED par la résine.

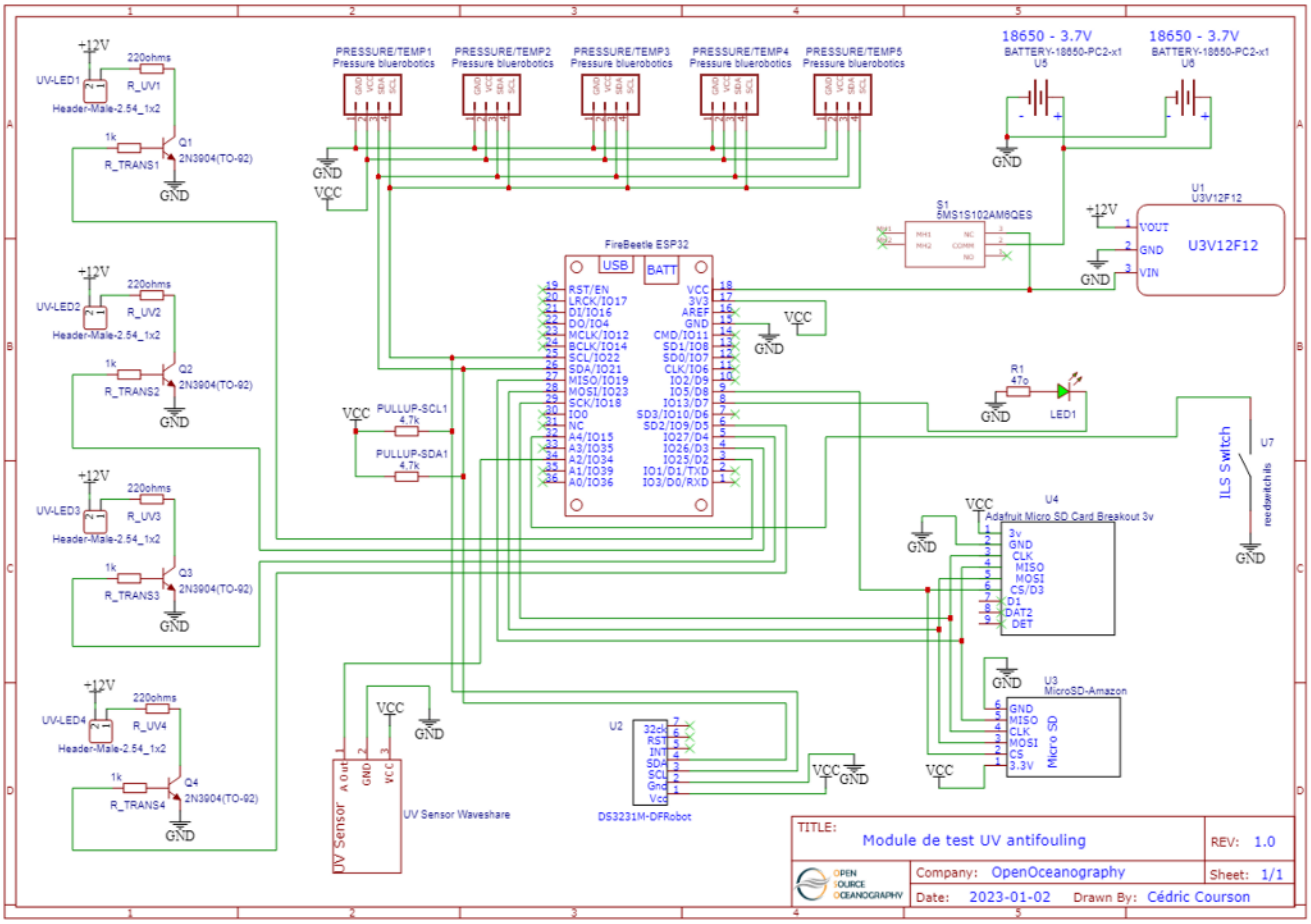


Figure 38: Plan de l'électronique de pilotage des LED UVC

Autonomie instrument LED UV

Les LED UV ont une consommation forte en énergie. Il a fallu mesurer la consommation totale du montage avec les fréquences choisies (cf protocole) à l'aide d'un voltmètre et d'une résistance de shunt.

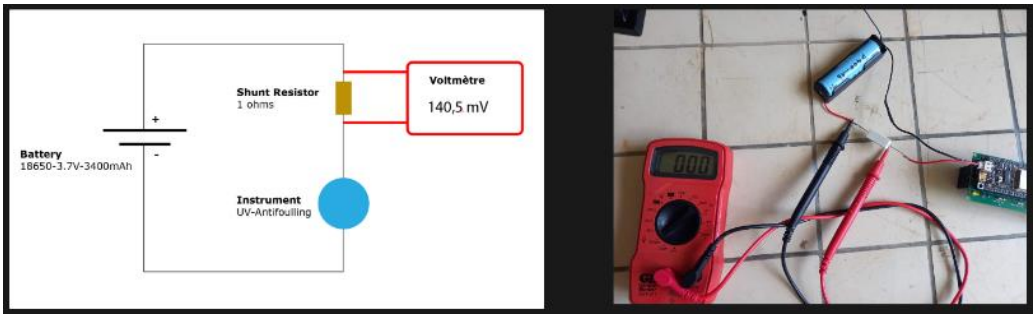


Figure 39 : montage pour mesure de consommation de l'instrument

Les mesures au voltmètre avec ce montage, et en utilisant la loi d'ohm $U = R * I$, soit $I_{mesuré} = \frac{U_{mesurée}}{R_{shunt}}$, avec une résistance de 1ohm on obtient directement $I_{mesuré}(mA) = U_{mesuré}(mV)$

On obtient les résultats suivants :

Veille	1mA
LED 1 allumée seule	165mA
4 LED allumées	600mA

En utilisant les fréquences d'utilisations choisies on obtient une autonomie approximative de 35j pour 4 batteries li-ion de 3.7v 3400mAh. Ce qui sera suffisant pour notre test.

Mise à l'eau

L'instrument est placer sur une bouée sous l'eau dans le lagon de Vairao juste en face de la station Ifremer à une profondeur d'environ 4m. La zone 3 à 5m étant une zone qui reçoit beaucoup de lumière, elle est propice à l'apparition de fouling. Pour éviter les gênes du au passage des bateaux, on se place à plus de 3m de profondeur.

L'instrument est placé 10j sous l'eau durant lesquels il est resté sans intervention humaine.

Figure 40 : Emplacement de test pour le système antifouling

Résultats

Après 10j l'instrument était encore parfaitement fonctionnel au niveau électronique. Batterie et étanchéité ont donc tenu le coup. Cependant 3 LED sur 4 ne s'allume plus. Surrement dû à une infiltration d'eau directement dans la LED malgré la protection en résine époxy. Les LED sont en effet protégées par une petite plaque de verre qu'il a fallu éviter de recouvrir de résine, les joints de cette plaque ne sont pas prévus pour aller en profondeur, et ils ont pu laisser l'eau de mer s'infiltré.

Les LED 1, 2 et 3 sont donc HS, et la LED 4 est encore parfaitement fonctionnel. Mais on ne sait pas quand ces LED ont cessé de fonctionner.

La zone 4 est un exemple ou la LED à pu fonctionner pendant 10j, et dans ce cas on peut voir une stérilisation efficace de la surface par rapport au zone témoin, ce qui à empêcher la formation de fouling.

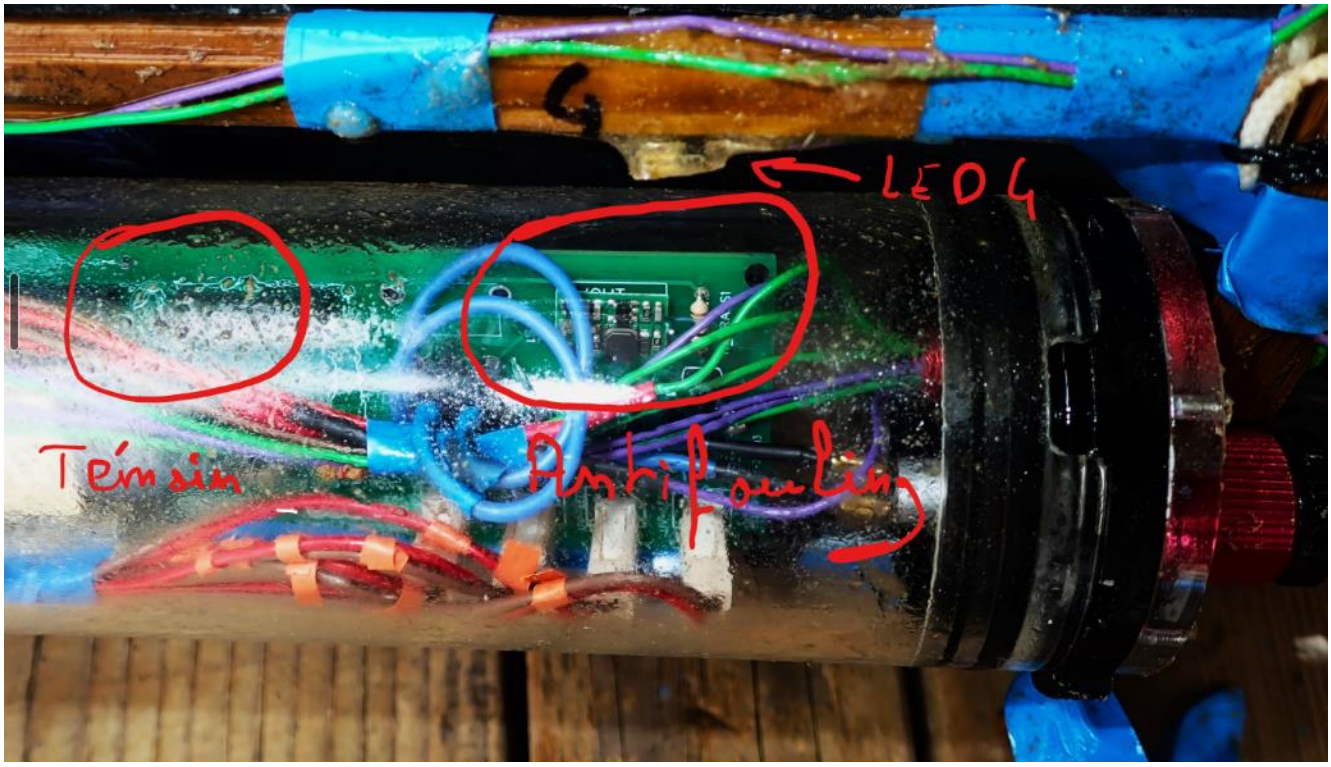


Figure 41 : Résultats de l'éclairage UVC sur le biofouling

Sur les zones 1,2,3, on peut voir que la formation du biofouling a été moindre que sur les zones témoins, signe que les LED ont pu fonctionner pendant quelques jours avant de prendre l'eau.

CONCLUSION & PERSPECTIVES

PERFORMANCES

Les résultats montrent que le choix adapté pour les eaux oligotrophe des lagons est le capteur Turner. C'est le seul qui présente une sensibilité suffisante et qui soit adaptable à nos systèmes open-source.

Coté enregistrement, tous les tests courte et longue durée ont montré une bonne fiabilité de la captation et l'enregistrement des données signe de la fiabilité électronique, ainsi qu'une très bonne tenue mécanique et à l'étanchéité. Les données sont également conformes en termes de précisions par rapport aux besoins des lagons.

La version actuelle de la conception avec un capteur Turne est validé pour une utilisation en lagon.

Dans un autre projet de recherche similaire, il serait intéressant de chercher à construire un capteur de fluorimétrie open source pour remplacer le capteur Turner qui aujourd'hui encore très cher.

AUTONOMIE

L'autonomie dans un configuration de batterie minimale avec une fréquence de mesure moyenne (3 mesures toute les 30mins) est d'environ 2 mois.

Avec ce pack batterie minimaliste l'instrument est léger et flotte. Les 6 batteries de 3.4Ah, 3.7V représente une source d'énergie de 75 Wh.

L'avantage de la conception du système est que l'on peut rajouter autant de batteries que l'on souhaite et modifier la fréquence d'acquisition (1 par heure par exemple) pour augmenter considérablement l'autonomie.

Par exemple en assemblant les batteries en « pack » (collée ensemble), on pourrait créer des packs de 13 batterie équivalent à 45 Ah (soit 166 Wh). Avec 2 packs comme celui-là (soit 332Wh) on obtiendrait une autonomie de 9 mois, et en modifiant la fréquence 1 mesure par heure, on pourrait dépasser de beaucoup 1 an d'autonomie.
A titre de comparaison les systèmes professionnels existant (de type NKE ou RBR) ont des packs batteries entre 150 et 250 Wh pour une durée d'utilisation autour d'un an selon configuration.

ANTIFOULING

Les premiers essais avec ces LED UV comme antifouling ont montré de très bons résultats quant aux performances du rayonnement UVC pour protéger la surface des capteurs. L'aspect stérilisation de la surface pour stopper le 1er biofilm puis la formation de fouling est efficace. Cependant l'étanchéité actuelle n'est pas obtenue.

Il faudra travailler l'intégration mécanique des LED UV en particulier sur la partie étanchéité pour une immersion prolongé et à différente profondeur (ici les besoins vont entre 0 et 15m environ).

Une fois l'étanchéité résolu, il faudra tester le système sur des durées plus longues et faire des essais à plusieurs fréquences d'éclairage pour trouver le meilleur ratio efficacité/autonomie.
L'autonomie sera en effet un point crucial du développement de ce système, les LED UV étant gourmande en énergie.

DEVELOPPEMENT LOCAL

Les perspectives de développement sur le territoire Polynésien nous semble intéressant pour plusieurs raisons :

- Les outils open source et la possibilité de les fabriquer localement offre une réelle perspective d'évolution de la capacité du territoire à obtenir des connaissances scientifiques sur l'environnement marin. Le territoire est très grand et très éparpillé, la démonstration de faisabilité de ce projet offre une alternative dans les moyens et les coûts pour développer un parc instrumental des lagons. Et même si le coût de certains capteurs est encore élevé, il reste une vraie alternative financière aux solutions préexistantes. De plus selon les besoins, il sera possible d'équiper les instruments avec moins de capteurs ou des capteurs différents et donc des coûts encore plus réduits. L'appropriation de ces méthodes de construction ouverte est une opportunité pour entretenir et réparer les instruments localement et donc devenir autonome dans l'acquisition des connaissances marines.
- Ces nouvelles connaissances marines acquises représentent un levier important pour la bonne connaissance et donc la bonne gestion des environnements lagonaires. Selon les perliculteurs, ces instruments peuvent devenir un moyen de connaitre le lagon en temps réel, et en tant que telle des outils de gestion de ferme perlicole.
- Il existe sur le territoire polynésien une variété intéressante d'acteurs qui peuvent contribuer au déploiement et au suivi d'un réseau d'observatoires lagonaires. A travers les associations environnementales comme les perliculteurs et pêcheurs, il y a là une véritable force vive pour développer ce réseau.

Pour la suite de ce projet il serait pertinent technologiquement parlant de travailler sur la conception de capteur de précision open source pour la mesure de chlorophylle afin de remplacer le capteur Turner. Aujourd'hui les développements de capteur de fluorimétrie ne sont pas encore au niveau de précision pour répondre aux besoins des eaux lagonaires mais un travail de recherche et développement technologique permettrai surrement une grande avancé.

Pour le développement territorial dans les îles, il y a toute une communauté d'acteurs que nous n'avons pas rencontré, mais qui est bien présente et développé. Il s'agit des acteurs liés au tourisme qui sont répartit sur tout le territoire polynésien y compris dans les atolls reculés. Entre les communautés de plongeurs, et charters, ou autre sortie en mer, il y a là des communautés qui sont présentent toute l'année, et pour qui la bonne santé du lagon est un enjeu financier. Ce qui offre un levier de participation à un programme comme Open Lagoon.

BIBLIOGRAPHIE

Marcelli, M., Viviana Piermattei, RICCARDO GERIN, F. Brunetti, Ermanno Pietrosemoli, SAM ADDO, LOBDA BOUDAYA, et al. « Toward the widespread application of low-cost technologies in coastal ocean observing (Internet of Things for the Ocean) ». Mediterranean Marine Science, 16 mars 2021. https://doi.org/10.12681/mms.25060.

University of Maine, Orono, Nils Haëntjens, et Emmanuel Boss. « Inlinino: A Modular Software Data Logger for Oceanography ». Oceanography 33, nº 1 (1 mars 2020): 80-84. https://doi.org/10.5670/oceanog.2020.112.

Ryan, Emmet, Serkan Turkmen, et Simon Benson. « An Investigation into the Application and Practical Use of (UV) Ultraviolet Light Technology for Marine Antifouling ». Ocean Engineering 216 (15 novembre 2020): 107690. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107690.

Hixson, Jase L., et Adam S. Ward. « Hardware Selection and Performance of Low-Cost Fluorometers ». Sensors 22, nº 6 (17 mars 2022): 2319. https://doi.org/10.3390/s22062319.

Langis, Daniel P. « Arduino Based Oceanographic Instruments: An Implementation Strategy for Low-Cost Sensors », 7 juillet 2015. http://dspace.calstate.edu/handle/10211.3/142085.

Beddows, Patricia A., et Edward K. Mallon. « Cave Pearl Data Logger: A Flexible Arduino-Based Logging Platform for Long-Term Monitoring in Harsh Environments ». Sensors 18, nº 2 (février 2018): 530. https://doi.org/10.3390/s18020530.

Pascal Lazure; David Le Berre; Laurent Gautier. « Mastodon Mooring System To Measure Seabed Temperature Data Logger With Ballast, Release Device at European Continental Shelf ». ResearchGate.

Nolet, Émilie. « Pour une histoire de l'histoire des îles basses : le cas des Tuamotu ». In Pour une histoire de la préhistoire océanienne : Approches historiographiques de l'archéologie francophone dans le Pacifique, édité par Anne Di Piazza, Matthew Spriggs, Frédérique Valentin, et Emilie Dotte-Sarout, 239-68. Cahiers du Credo. Marseille: pacific-credo Publications, 2020. https://doi.org/10.4000/books.pacific.1177.

Thomas, Yoann. « Ecologie larvaire de l'huître perlière (Pinctada margaritifera, L.), croissance et dispersion dans un lagon d'atoll polynésien ». Université de Bretagne Occidentale Thèse de doctorat (21 décembre 2029).

Cigliano, John A., Ryan Meyer, Heidi L. Ballard, Amy Freitag, Tina B. Phillips, et Ann Wasser. « Making Marine and Coastal Citizen Science Matter ». Ocean & Coastal Management, Making Marine Science Matter: Issues and Solutions from the 3rd International Marine Conservation Congress, 115 (1 octobre 2015): 77-87. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.06.012.

European Marine Board. « Advancing Citizen Science for Coastal and Ocean Research », 2017. https://marineboard.eu/publication/advancing-citizen-science-coastal-and-ocean-research.

Sauleau, Pierre, Pauline Poisson, et Riwalenn Ruault. « Les sciences participatives dédiées à la mer et au littoral breton: état des lieux, recommandations et prospectives pour les universités ISblue », s. d.

Service mixte de surveillance radiologique et biologique. Le monde vivant des atolls : Polynésie française. Le monde vivant des atolls : Polynésie française. Publications de la SdO. Paris: Société des Océanistes, 2013. https://doi.org/10.4000/books.sdo.330.

ANNEXES 1 – LIENS FCHIERS SOURCE

Code et fichiers sources pour la construction et programmation

La page notion qui centralise les infos pour la dernière version de l'instrument :

https://www.notion.so/cedriccoursonopensourceoceanography/Proto-V4-eb3701b454434c9cbf8021ed74c0992c?pvs=4

Le code du logiciel ainsi que les plans électronique et les plans pour le boitier sont disponibles sur le lien GitHub du projet.

https://github.com/CedricCourson/Fluorimeter

Un lien WikiFactory détail les étapes de construction de l'instrument. Il s'agit d'un tuto pas à pas pour assembler et configurer les différentes parties de l'instruments.

https://wikifactory.com/@cedriccourson/oso-multiparam%C3%A8tre

ANNEXE 2 – COUT DES COMPOSANTS ET FOURNISSEURS

Classe	Composant	Qt	Fournisseur conseillé	Aternative local ou plus proche	Prix	Taxe	Total
Sensors	Turner C-Fluor	1	EMS Oceanographica (ES)	Aqualab (NZ)	4 029.00 €	1 208.70 €	5 237.70 €
Sensors	Temperature Fast30 Blue Robotics	1	Syera (FR)	BayDynamics(NZ)	82.00 €	24.60 €	106.60 €
Sensors	Pression Bar30 Blue Robotics	1	Syera (FR)	BayDynamics(NZ)	95.00 €		95.00 €
Sensors	Conductivité EZO-EC board	1	Sensorsandprobes (NL)	Atlas Scientific (US)	86.25 €	25.88 €	112.13 €
Sensors	Conductivité EC probe K=1, Atlas Scientific	1	Sensorsandprobes (NL)	Atlas Scientific (US)	137.50 €	41.25 €	178.75 €
Sensors	Conductivité Isolator board Atlas Scientific	1	Sensorsandprobes (NL)	Atlas Scientific (US)	29.00 €	8.70 €	37.70 €
Sensors	Température interne DS18B20	1	ElectroSAV	ElectroSAV	4.00 €		4.00 €
Datalog	PCB	1	JLCPCB (CN)	PCBWAY(CN)	20.00 €	6.00 €	26.00 €
Datalog	ESP32 Firebeetle DFRobot	1	ElectroSAV	GoTronic (FR) RS Component	14.00 €		14.00 €
Datalog	Micro SD reader	1	ElectroSAV	GoTronic (FR) RS Component	7.00 €		7.00 €
Datalog	Micro SD card 8G0	1	ElectroSAV	GoTronic (FR) RS Component	10.00 €		10.00 €
Datalog	RTC Clock DS3231	1	ElectroSAV	GoTronic (FR) RS Component	9.00 €		9.00 €
Datalog	Battery CR1220	1	Hyper Brico, ACE	GoTronic (FR) RS Component	1.00 €		1.00 €
Datalog	Battery 16650	6	Tahiti Vaposhop + tout vaposhop	LetmeKnow (FR)	20.00 €		120.00 €
Datalog	Battery Holder	2	ElectroSAV	GoTronic (FR) RS Component	2.33 €		4.67 €
Datalog	Led 5mm 20mA	1	ElectroSAV	GoTronic (FR) RS Component	0.50 €		0.50 €
Datalog	Resistor 4,7 KOhms	3	ElectroSAV	GoTronic (FR) RS Component	0.10 €		0.30 €
Datalog	Resistor 10 KOhms	2	ElectroSAV	GoTronic (FR) RS Component	0.10 €		0.20 €

Datalog	Resistor 1kOhms	1	ElectroSAV	GoTronic (FR) RS Component	0.10 €		0.10 €
Datalog	Resistor 220 Ohms	3	ElectroSAV	GoTronic (FR) RS Component	0.10 €		0.30 €
Datalog	Capacitor 47 pf	1	ElectroSAV	GoTronic (FR) RS Component	0.20 €		0.20 €
Datalog	Capacitor 1nF	1	ElectroSAV	GoTronic (FR)RS Component	0.20 €		0.20 €
Datalog	Capacitor 100nF	1	ElectroSAV	GoTronic (FR) RS Component	0.20 €		0.20 €
Datalog	Reed Switch NO	1	ElectroSAV	GoTronic (FR) RS Component	1.00 €		1.00 €
Datalog	Reed Switch NF	1	ElectroSAV	GoTronic (FR) RS Component	1.00 €		1.00 €
Datalog	Transistor 2N3904	1	ElectroSAV	GoTronic (FR) RS Component	0.15 €		0.15 €
Datalog	Max3232	1	ElectroSAV	GoTronic (FR) RS Component	3.00 €		3.00 €
Datalog	Buzzer	1	ElectroSAV	GoTronic (FR) RS Component	2.00 €		2.00 €
Datalog	Connecteur NSK 4 fils M	2	ElectroSAV	GoTronic (FR) RS Component	0.10 €		0.20 €
Datalog	Connecteur NSK 4 fils F	2	ElectroSAV	GoTronic (FR) RS Component	0.20 €		0.40 €
Datalog	Connecteur NSK 2 fils M	2	ElectroSAV	GoTronic (FR) RS Component	1.00 €		2.00 €
Datalog	Connecteur NSK 2 fils F	2	ElectroSAV	GoTronic (FR) RS Component	0.20 €		0.40 €
Datalog	Connecteur Trilux cosse	4	ElectroSAV	GoTronic (FR) RS Component	0.10 €		0.40 €
Datalog	Bornier 2pin	3	ElectroSAV	GoTronic (FR) RS Component	1.00 €		3.00 €
Datalog	Interrupteur on off RS : 734-7296	1	ElectroSAV	GoTronic (FR) RS Component	6.50 €		6.50 €
Datalog	Connecteur JST 4 pin	2	ElectroSAV	GoTronic (FR) RS Component	2.00 €		4.00 €
Datalog	Connecteur JST 8 pin	1	ElectroSAV	GoTronic (FR) RS Component	2.00 €		2.00 €
Datalog	Module d'alimentation DFRobot DFR0535	1	ElectroSAV	GoTronic (FR) RS Component	46.00 €		46.00 €
Datalog	Escreen Epaper Waveshare	1	ElectroSAV	GoTronic (FR) RS Component	20.00 €		20.00 €

	2.9"						
Datalog	Entretoise 6mm, M3	8	ElectroSAV	GoTronic (FR) RS Component	0.50 €		4.00 €
Datalog	Vis M3x5mm	10	VBP	RS Component Vis express(FR)	0.10 €		1.00 €
Boitier	Tube PVC pression 90mm	1	Hyper Brico, ACE, recup Ifremer …		20.00 €		20.00 €
Boitier	Disque Bouchon Plexi 10mm	1	Matuvuu tahiti		34.00 €		34.00 €
Boitier	Tige inox M5 L60cm	3	VBP	RS Component Vis express(FR)	5.00 €		15.00 €
Boitier	Ecrou inox M5	10	VBP	RS ComponentVis express(FR)	0.50 €		5.00 €
Boitier	Ecrou papillon M5	3	VBP	RS Component Vis express(FR)	1.00 €		3.00 €
Boitier	Rondelle M5	10	VBP	RS Component Vis express(FR)	0.50 €		5.00 €
Boitier	Plaque support PCB, plexi 5mm	1	Matuvuu tahiti		15.00 €		15.00 €
Boitier	Vis M5x30 inoxA4	5	VBP	RS Component Vis express(FR)	0.50 €		2.50 €
Boitier	Joint plat M5	5	RS component 123 Roulement (Fr)		2.00 €		10.00 €
Boitier	Joint Turner (joint torique 20/24mm ep:2mm)	2	RS component 123 Roulement (Fr)		9.00 €		18.00 €
Boitier	Joint bouchon (joint torique 76/70mm ep:3mm)	4	RS component 123 Roulement (Fr)		9.00 €		36.00 €
Boitier	Joint Atlas (joint torique 12/16 mm ep:2mm)	2	RS component 123 Roulement (Fr)		9.00 €		18.00 €
						Total TTC	**6 244.09 €**
						Total Hors capteur turner :	*1 006.39 €*

						Total capteur :	5 771.88 €
						Total capteur hors Turner :	*534.18 €*
						Total électronique datalog :	290.72 €
						Total boitier :	181.50 €