

Rapport CONFIDENTIEL

(cocher la case correspondante)

NON

OUI

Si oui est coché, signature du tuteur entreprise obligatoire



5A GSI - Option ACAD

Année Universitaire :

2022 / 2023

Développement de kits de mesure low cost

RAPPORT DE STAGE



Tuteur Laboratoire :

**COULOMBIER
Thibault**

Ingénieur d'étude

Enseignant référent :

**CONSTANTIN
Didier**

LA ROCHELLE UNIVERSITE

LA ROCHELLE (17)

Remerciements

Mon stage aura été d'une grande richesse d'apprentissages, et restera gravé dans ma mémoire comme ma première expérience dans le monde de la recherche. Vous êtes nombreux à avoir rendu possible cette expérience, plus qu'enrichissante, et je tiens à vous en remercier personnellement.

Je tiens à remercier mon école, l'INSA Centre Val de Loire, ainsi que tout son personnel ayant rendu ce stage possible. Cette expérience était nécessaire à ma formation, et je suis très heureux qu'elle ait pu avoir lieu. Je souhaite remercier le service des relations entreprises pour son travail et son organisation. Merci également à Mr. Didier Contantin, pour avoir assumé le rôle de tuteur INSA.

Je remercie l'Université de La Rochelle, ainsi que le laboratoire LIENSs, de m'avoir accueilli si chaleureusement au sein d'une de ses équipes de recherche, dans laquelle j'ai pu découvrir l'ingénierie au service de ce monde si passionnant.

Merci à Thibault Coulombier, Julien Ancelin et Denis Dausse, d'avoir tutoré mon stage de manière exemplaire. J'ai passé d'excellents moments à travailler à vos côtés. Vos conseils ont toujours été de qualité, et vous m'avez énormément appris.

Un grand merci à mes amis stagiaires pour votre sympathie et votre aide ; pour tous vos délicieux gâteaux, généreusement partagés en salle de pause ; et tous les précieux moments passés avec vous, au laboratoire comme à crapahuter dans cette belle ville qu'est La Rochelle.

Je remercie également les équipes de recherche, les contractuels, et toute autre personne du LIENSs avec qui j'ai pu travailler, pour leur sympathie et leur aide. Merci aux relecteurs de ce rapport, d'avoir bien voulu donner de leur temps libre pour corriger mes erreurs, et apporter leurs précieux conseils. Sans vous, ce rapport ne serait pas ce qu'il est aujourd'hui !

Enfin merci à tout organisme et toute personne ayant participé de près comme de loin à rendre ce stage possible, et que je n'ai pas cité explicitement.

Merci à tous et bonne lecture !

Résumé

Depuis toujours, les données sont au cœur de l'activité de recherche en sciences environnementales. Sur de vastes étendues, leur acquisition dans l'espace et dans le temps permet d'y étudier et de mieux comprendre les phénomènes à l'œuvre. Cependant, la prise de mesures est entravée par les coûts financiers et logistiques des campagnes de mesures. Ce rapport de stage synthétise six mois de développement d'un système de kits de mesure *low cost*, destiné aux sciences participatives. Ce dernier a pour objectifs de faciliter la prise de mesure sur le terrain, ainsi que la mise à disposition et l'accès aux données. Sa longue phase de conception a permis de rédiger un Cahier des Charges Fonctionnel rassemblant les fonctionnalités qu'il doit satisfaire pour répondre aux besoins des chercheurs. À partir de celui-ci, deux kits de mesure ont été développés sur la base d'un microcontrôleur et de capteurs *low cost*. L'un permet de mesurer le niveau de la mer, et l'autre, les caractéristiques de l'eau. Un étui étanche a été assemblé afin de les protéger de l'environnement marin, les rendant aptes à fonctionner en mer. Une passerelle, basée sur l'utilisation d'un Raspberry Pi, permet de récupérer les données de ces sous-systèmes, afin de les rendre accessibles localement et sur internet. Elle embarque une base de données PostgreSQL et un serveur Grafana, permettant leur stockage et visualisation. L'apparition de capteurs *low cost* sur le marché pourrait permettre de drastiquement réduire les coûts de mesure. Leurs performances sont néanmoins inférieures aux sondes habituellement utilisées en laboratoire. L'évaluation des capteurs que nous avons pu nous procurer est donc en cours, afin de déterminer leurs limites, et de leur attribuer un contexte d'utilisation. Le système réalisé n'est pas encore terminé, mais une fois éprouvé, il pourra être embarqué à bord de navettes à passagers, ou de voiliers de plaisance, afin d'augmenter la résolution spatiale et temporelle en données de zones maritimes fréquentées, telles que les pertuis Rochelais. Ces données pourront par exemple servir à la calibration du satellite altimétrique SWOT les survolant.

Mots clés : capteurs, conception, datalogger, données, GNSS, kits de mesure, low cost, métrologie, microcontrôleurs, open source, programmation embarquée, sciences participatives, temps réel, visualisation

Abstract

Data have always been at the heart of environmental science research. Their spatial and temporal acquisition over vast areas enables scientists to study and better understand the phenomena at work. However, taking measurements is hampered by the financial and logistical costs of measurement campaigns. This internship report summarises six months spent on developing a low-cost system of measuring kits intended for participatory science. Its aim is to make in the field measurement taking easier, and to assist in making the data available and accessible. During its long design phase, a functional specification was drawn up, setting out the functionalities it must meet in order to satisfy its requirements. From this, two measurement kits were developed, based on a microcontroller and low-cost sensors. One measures sea level, and the other handles water characteristics. A waterproof case has been assembled to protect these kits from marine conditions, making them suitable for use on boats. A gateway, based on a Raspberry Pi, is used to retrieve the data from these sub-systems and make them accessible locally and over the Internet. It embeds a PosgreSQL database and a Grafana server to store and display the data. The arrival of low-cost sensors on the market could drastically reduce measurement costs. However, their specifications are inferior to those of the probes used in laboratories. For this reason, the sensors we found are under evaluation, in order to determine their capabilities and to give them a context of use. The system is not yet perfect, but once tested, it could be taken on board passenger shuttles or pleasure sailing boats to increase the spatial and temporal data resolution of busy maritime areas such as the harbours around La Rochelle. This data could for instance be used to calibrate the SWOT altimetry satellite that flies over these areas.

Keywords : conception, data, datalogger, embedded programming, GNSS, low cost, measuring kits, metrology, microcontrollers, open source, participatory science, real time, sensors, visualization

Table des matières

Introduction	4
Développement	6
1 Présentation du laboratoire LIENSs	6
2 Description du projet	9
2.1 Contexte	9
2.2 Objectifs	10
2.3 Architecture système	11
3 Conception du système	14
3.1 Formulation des besoins	14
3.2 Cahier des charges fonctionnel	16
3.2.1 Le cycle de vie	16
3.2.2 Les Eléments du Milieu Extérieur	16
3.2.3 Le système	17
3.2.4 Les satellites	20
3.2.5 La passerelle	24
4 Gestion du projet	28
4.1 Dépôt Git et Github	28
4.2 Suivi du projet	28
5 Développement logiciel	31
5.1 Les satellites	31
5.1.1 Etat de l'art	31
5.1.2 Conception	32
5.1.3 Développement	34
5.2 La passerelle	37
5.2.1 Communication et visualisation des données	37
5.2.2 Automatisation de l'installation	38
6 Assemblage du projet	40
6.1 Le logger d'évaluation capteurs	40
6.2 La valise multi-satellites	41
7 Evaluation des capteurs	45
7.1 Méthode d'évaluation	45
7.2 Evaluation des altimètres	46
7.3 Essai de calibration des sondes de turbidité et de salinité	46

Conclusion	49
Bibliographie	50
Liste des tableaux	51
Table des figures	52
Glossaire	53
Annexes	
A Cahier des charges fonctionnel	
B Synthèse des projets	
C Evaluation des altimètres	

Note : Ce document a été rédigé en utilisant le langage de balisage \LaTeX , grâce auquel un système de renvois à différents endroits du rapport a été mis en place, afin d'améliorer le confort de lecture sur écran. Ceux-ci sont tous cliquables, mais pour un problème de lisibilité, ils ont été colorés identiquement au texte. Il convient alors de connaître les différents types de renvois, afin de les identifier. Ceux-ci comprennent les références vers les Figures, Tableaux, Annexes, Chapitres et Sections ; pour lesquels il suffit de cliquer sur le chiffre les identifiant pour être redirigé à l'endroit concerné. Un glossaire a également été mis en place, et si jamais un mot ou un acronyme vous est inconnu, il est fort probable qu'en cliquant dessus, vous soyez amené à sa définition dans le glossaire.

Introduction

J'ai depuis toujours été attiré par la science et l'informatique. Avant d'entrer dans les études supérieures, je faisais une distinction claire entre ces deux domaines, qui me paraissaient incompatibles. Ne sachant lequel choisir, je me suis alors orienté vers un parcours généraliste, me permettant de rebondir dans l'une de ces deux directions, et dans l'espoir qu'il m'aide à prendre une décision. Mes cinq années passées à l'INSA Centre Val de Loire, à découvrir le très large spectre de la science, n'ont fait qu'atiser ma curiosité, et j'ai réalisé que sciences et informatique étaient bien loin d'être décorrélées. Aujourd'hui, le choix n'est alors plus tellement binaire, mais porte plutôt sur une infinité de possibilités d'application de l'informatique et de l'électronique, au service de la science. Les enseignements dispensés par l'INSA CVL m'ont néanmoins permis d'identifier des disciplines qui m'attirent davantage. J'ai donc décidé d'orienter mon projet professionnel dans les systèmes embarqués, tels que les instruments de navigation.

Au cours de mes années en école d'ingénieur, j'ai également développé une certaine conscience écologique, ainsi qu'un attrait pour le monde marin et la voile. Mon semestre d'études à Valence (Espagne), réalisé dans le cadre du programme Erasmus+, m'a également ouvert les portes vers le monde des sciences environnementales, et plus particulièrement de l'océanographie. Ceci m'a permis de préciser mon projet professionnel, en l'orientant davantage vers le monde marin.

Depuis, je m'efforce de réaliser mes stages autour de sujets combinant au maximum ses différentes disciplines, et restant en accord avec mes convictions. L'année dernière, j'ai été comblé par mon séjour chez HY-GENERATION, start up bretonne fabriquant des propulseurs électriques pour bateaux à Vannes. Cette année, je pensais ne pas avoir autant de chance, et craignais de ne pas trouver de sujet répondant si bien à mes critères. Et pourtant, suite à mon projet de fin d'études, sur la thématique du positionnement GNSS, je suis tombé pas hasard sur l'offre que je cherchais. Il s'agit d'un projet de systèmes à embarquer à bord de bateaux, destiné à la recherche en sciences environnementales, au sein d'un laboratoire œuvrant en faveur du développement durable, et dans une ville emblématique de la pratique de la voile. J'ai donc effectué mon stage de dernière année à La Rochelle, au sein du laboratoire LIENSs de l'Université, durant la période du 27/02/2023 au 25/08/2023, sur un projet de développement de kits de mesure *low cost*. Ses objectifs ont été :

- La réalisation d'un prototype de système de kits instrumentaux, sur une base *open source*, combinant mesures GNSS et environnementales.
- Le test et la comparaison de différents capteurs *low cost* (exactitude, résolution, coût, résistance).
- La validation du fonctionnement du système, et la qualité des données acquises.
- La documentation de la démarche ayant mené au prototype (état de l'art, développement logiciel et fabrication).
- La rédaction de notices grand public de duplication et de mise en fonctionnement.

Ce rapport présente donc les grandes phases de travail du projet, ayant abouties au système de kits de mesure en question. En premier lieu, une présentation du laboratoire permet de donner un premier aperçu du contexte d'apparition du projet. Ensuite, la présentation de ce dernier apporte les détails manquants à ce contexte, et permet de se familiariser avec les objectifs, et le cycle de développement du projet. Par la suite, la méthodologie de conception, la gestion du projet, le développement logiciel et l'assemblage du système sont détaillés. Finalement, le dernier chapitre est consacré à l'évaluation de capteurs *low cost* que nous avons pu nous procurer.

Développement

Chapitre 1

Présentation du laboratoire LIENSs

Le laboratoire Littoral Environnement et Sociétés[9] est une Unité Mixte de Recherche interdisciplinaire, accueillant des chercheurs de La Rochelle Université et du CNRS. Il intègre les compétences de nombreuses disciplines qui vont des sciences de l'environnement aux sciences humaines, en passant par la chimie et les biotechnologies. Le LIENSs tire profit de son interdisciplinarité et focalise ses recherches sur le fonctionnement, l'évolution, l'usage et l'exploitation du système littoral, pour servir les enjeux du développement durable en lien avec celui-ci.

Au sein du laboratoire, on trouve six équipes thématiques de recherche :

L'équipe AGILE (*Approche Géographique : Iles, Littoraux, Environnement*)

Ses travaux de recherche s'organisent autour d'un questionnement transversal : l'adaptation et la transformation des littoraux aux changements socio-environnementaux.

L'équipe AMARE (*Réponses des animaux MARins à la variabilité Environnementale*)

L'équipe AMARE vise à apporter, à l'aide d'organismes modèles, une vision intégrative des processus adaptatifs en milieu littoral à la variabilité environnementale, en cherchant à :

- Caractériser les réponses transcriptionnelles, physiologiques & comportementales.
- Comprendre comment ces réponses se répercutent de l'individu à la population.
- Apporter des éléments de compréhension sur l'acclimatation & les capacités adaptatives des organismes à différentes échelles d'intégration dans un contexte de changement global.

L'équipe BIOFEEL (*BIOdiversité et Fonctionnement des Ecosystèmes Littoraux*)

Elle étudie la structure et le fonctionnement des écosystèmes littoraux essentiellement par une approche en écologie trophique. L'équipe analyse la biodiversité et son rôle, depuis l'échelle de l'individu à celle de l'écosystème, et qualifie/quantifie l'évolution de ces écosystèmes en réponses aux changements environnementaux et aux enjeux sociétaux.

L'équipe développe des outils d'aide à la décision pour une gestion concertée et durable des ressources naturelles. Elle mobilise des approches de suivis et d'expérimentations de terrain, de laboratoire, d'analyses multivariées et de modélisation.

L'équipe BCBS (*Biotechnologies et Chimie des Bioressources pour la Santé*)

L'équipe regroupe plusieurs thématiques de recherche à l'interface des biotechnologies, de la chimie et de la biologie, permettant de répondre à deux défis scientifiques.

Le 1er défi est de découvrir, créer, inventer :

- de nouveaux principes actifs (naturels) qui seront peut-être les bioactifs de demain, issus ou inspirés des ressources marines ou des agro-ressources de notre littoral,
- de nouveaux procédés biotechnologiques ou chimiques éco-responsables pour élaborer ces principes actifs.

Le second défi est de comprendre les mécanismes d'actions de ces principes actifs à l'échelle moléculaire et cellulaire :

- quelles sont les cibles moléculaires (récepteurs, enzymes, transporteurs) ?
- quelles sont les modes d'interaction ?
- quelles sont les cinétiques d'action ?
- y a-t-il une relation entre la structure et le mode d'action ?

L'équipe ESTRAN (*Espaces, Sociétés, Territoires des Rivages Anciens et Nouveaux*)

L'équipe ESTRAN est une équipe pluridisciplinaire composée d'historiens et de géophysiciens travaillant sur la longue durée des sociétés littorales et de leurs rapports avec la mer.

L'équipe DPL (*Dynamique Physique du Littoral*)

Le projet de l'équipe DPL vise à mieux comprendre la dynamique physique des littoraux, tant du point de vue des processus physiques contrôlant la dynamique hydro-sédimentaire et leurs évolutions morphologiques que des changements environnementaux récents qui modifient ces systèmes : les variations absolues et relatives du niveau de la mer, les changements climatiques et la pression anthropique croissante.

Pour répondre à la transdisciplinarité des recherches menées, l'UMR LIENSs dispose de compétences et de moyens techniques très diversifiés. En effet, de nombreux plateaux techniques, et plateformes analytiques et techniques, sont mis à disposition des chercheurs. Parmi ceux-ci, le drone marin PAMELi^[10] (cf. Figure 1.1) s'inscrit particulièrement bien dans le contexte de ce stage. Il est né du besoin d'observations répétées, co-localisées et simultanées de différentes disciplines, et de l'archivage et l'accessibilité dans le temps de celles-ci. Ce système a été développé par la société anglaise ASV, en accord avec un cahier des charges fourni par le laboratoire.



FIGURE 1.1 – Photo du drone marin PAMELi

Une septième équipe de personnels BIATSS et ITA apporte un support technique et analytique aux chercheurs sur ces dispositifs et installations, ou bien peuvent venir en soutien aux équipes de recherche (analyses, sorties terrain, appui logistique, etc.).

Le LIENSs accueille de nombreux doctorants et chercheurs invités qui participent à la vie de laboratoire.

Ce stage s'est donc déroulé dans ce contexte organisationnel, sous la tutelle de Thibault Coulobrier, membre de l'équipe DPL en tant que personnel technique ; co-tutoré par Denis Dausse, employé du CNRS, et membre de l'équipe technique du LIENSs ; ainsi que Julien Ancelin, employé de l'INRAE, et invité du laboratoire. J'ai donc été intégré au sein de l'équipe DPL, afin de travailler comme personnel technique sur le développement de kits de mesure *low cost*, destinés aux équipes de recherche du laboratoire. L'organigramme Figure 1.2 représente les liens existants entre les différentes équipes du laboratoire et ma position de stagiaire.

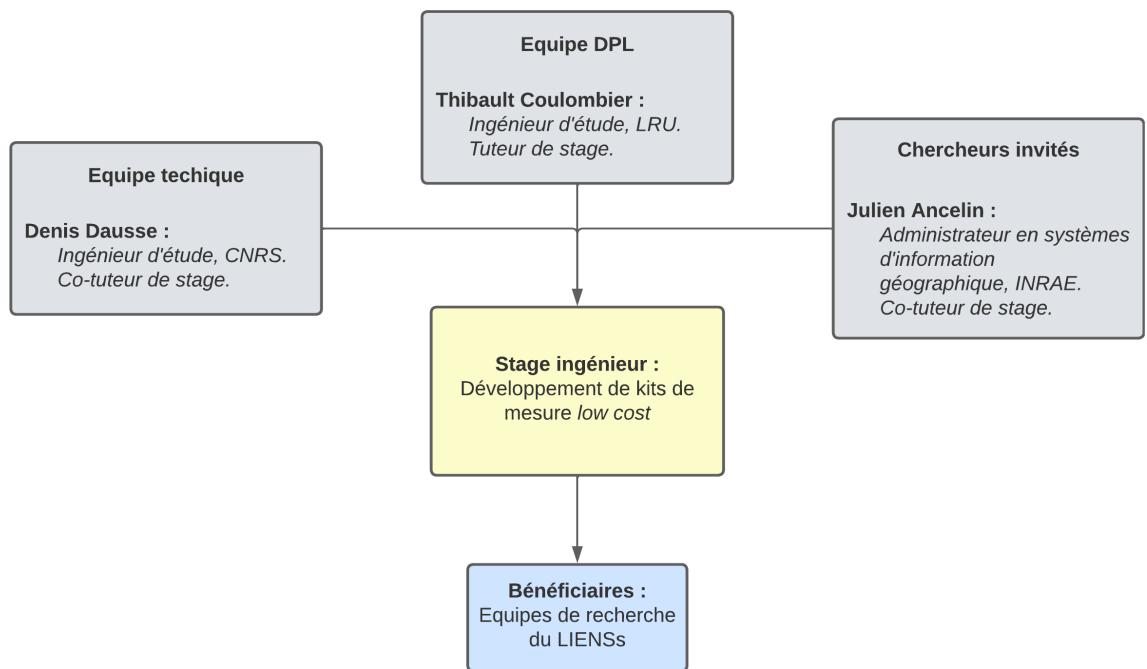


FIGURE 1.2 – Organigramme de contexte du stage

Chapitre 2

Description du projet

Ce chapitre a pour but d'aider le lecteur à comprendre les raisons de l'existence de ce projet. Il propose donc une mise en contexte plus détaillée que celle réalisée en introduction, notamment concernant les besoins globaux en données environnementales. S'ensuivent une explication des objectifs du projet et un aperçu global de l'architecture du système imaginé. Enfin, le cycle de développement et le déroulement du satge sont présentés.

2.1 Contexte

Cette section contextualise le projet en abordant l'actuel besoin de données dans le monde de la recherche, et en évoquant les leviers pouvant permettre de lever les freins entravant leur collecte, leur mise à disposition et leur accès.

Depuis toujours, la donnée est au cœur de l'activité de recherche en sciences environnementales. Sur de vastes étendues, leur acquisition dans l'espace et dans le temps permet d'y étudier les phénomènes à l'œuvre. Ces données peuvent par exemple servir de comparaison avec les prédictions de nouveaux modèles, et permettent ainsi leur validation ou l'identification des leviers majeurs impactant le phénomène étudié. Dans un contexte de réchauffement climatique, elles permettent également de montrer à différentes échelles temporelles des variables environnementales renseignant sur l'évolution du milieu. Les pertuis Rochelais sont par exemple une zone d'étude privilégiée du laboratoire LIENSs. Les chercheurs y étudient les caractéristiques physico-chimiques de l'eau et leur évolution, la dynamique sédimentaire ou le niveau de la mer.

Cependant, cette zone est assez mal couverte, et manque de données à exploiter. L'utilisation de ces données ne se limite pas au monde de la recherche. Avec l'augmentation des risques littoraux (surcôtes de tempêtes, érosion côtière, etc.), le monitoring en temps réel des zones à risque est également devenu un enjeu majeur pour la protection des populations.

En cas d'absence de données, ou si la prise de mesures sur le terrain s'avère onéreuse et compliquée, les chercheurs utilisent des jeux de données existants, plus ou moins facilement accessibles sur différentes IDG partagées[1][7]. Ces données, parfois anciennes, ne répondent pas toujours parfaitement aux questions scientifiques en cours, et leur extension spatiale est souvent limitée à l'emprise géographique des projets précédents. L'accès à des données fiables constitue donc un enjeu de facilitation du travail des chercheurs et de la qualité de leurs travaux.

Couvrir fréquemment de larges zones n'est pas réalisable à l'échelle d'un laboratoire seul. Depuis une dizaine d'années, de nombreuses associations mettent alors en place des projets de sciences participatives[2] pour répondre à ces besoins en données. Ceux-ci ont un objectif double : récolter massivement et fréquemment des données environnementales, tout en permettant au grand public d'apporter sa contribution à la recherche. Pour le LIENSs, inviter les voiliers, les navires à passagers et les bâteaux de courses, à participer à la recherche littorale est une réelle opportunité pour accroître la résolution spatiale et temporelle des données environnementales des pertuis, et diminuer l'impact environnemental des campagnes océanographiques.

L'apparition récente de composants électroniques à faible coûts a permis le développement de nombreux projets de kits de mesure comme SETIER[11], SensOcean[5], OceanIsOpen[13] ou

encore les bouées Physalia[3]. Les laboratoires scientifiques se sont récemment saisis de cette thématique, et les journées Ti'Low COAST, organisées en septembre 2022 à Brest, ont permis de mettre en valeur de nombreuses initiatives « *low cost* » portées par des laboratoires en France. Dans le cadre des travaux de recherche du LIENSs dans les espaces naturels comme les pertuis, les mesurandes les plus précieux sont le niveau marin et les caractéristiques de l'eau. La position GNSS et le temps UTC sont utilisées pour qualifier ces données.

La commercialisation de récepteurs GNSS précis à des prix abordables, et la montée en puissance du réseau Centipède, permettent désormais d'atteindre une précision de positionnement GNSS millimétrique pour bien moins cher que chez les fournisseurs de solutions propriétaires très peu permissives.

La venue de capteurs environnementaux « *low cost* » sur le marché a drastiquement fait chuter les coûts d'acquisition de données, en permettant le développement de ces kits de mesure sur mesure. Ces équipements bon marché ont souvent des spécifications techniques inférieures aux sondes habituellement utilisées au laboratoire, mais peuvent tout à fait être adaptés à des situations moins exigeantes, et permettre d'appréhender les variations importantes des paramètres de l'eau en environnement côtier, tout en proposant une meilleure maîtrise des coûts.

Ce projet s'inscrit donc dans un contexte de besoin d'acquisition de données environnementales dans les pertuis. Pour y subvenir, un système de kits de mesure *low cost* et de mise à disposition des données a été imaginé.

2.2 Objectifs

Ce projet s'articule autour de quatre thématiques : le premier concerne la production de données environnementales dans les pertuis Rochelais, le second, la mise à disposition et l'accès aux données, le troisième, la maîtrise des coûts de mesure et le quatrième, l'évaluation des capteurs « *low cost* » du marché.

L'objectif principal du projet réside dans l'augmentation de la résolution spatiale et temporelle des données environnementales des pertuis. Pour cela, nous avons premièrement souhaité faciliter la prise de mesures sur le terrain en développant des kits de mesure pratiques et autonomes à embarquer à bord de bateaux. Nous avons également eu recours à la science participative pour étendre les zones de mesures et augmenter la portée et la fréquence d'acquisition.

Le système final sera destiné aux chercheurs, déjà familiers avec la prise de mesures, ainsi qu'à toute personne ou organisme n'ayant pas de connaissances ou compétences préalables, mais souhaitant tout de même participer à la collecte de données. Dans l'idéal, nous souhaiterions équiper un maximum d'embarcations. Les navires à passagers, traversant la zone plusieurs fois par jour, seront les principales cibles. Une fois le système en place, nous nous tournerons vers les plaisanciers et régatiers.

Une attention particulière est accordée à la mise à disposition et à l'accès aux données. Les principaux freins à celles-ci étant le transfert laborieux des mesures réalisées sur le terrain en base de données et la multiplication des plateformes de stockage en ligne. L'objectif sera donc d'automatiser le stockage des données, et de les centraliser pour faciliter leur accès.

La maîtrise des coûts de mesure participera également à faciliter la prise de mesures. Des équipements moins chers, mais qualifiés en précision, rebutteront moins les chercheurs et particuliers à l'achat et à l'utilisation dans des conditions difficiles.

La maîtrise des coûts passe par le développement de kits de mesures bien dimensionnés aux besoins. Une évaluation des capteurs « *low cost* » intéressants du marché est donc nécessaire, le but étant de déterminer leurs caractéristiques et tester leurs limites, afin de leur attribuer un contexte d'utilisation.

Les objectifs du projet étant maintenant clairs, la section suivante présente l'architecture globale du système imaginé pour répondre à ceux-ci.

2.3 Architecture système

Afin de répondre aux objectifs évoqués ci-dessus, un système de kits de mesure modulaire a été imaginé. Chaque kit a pour missions l'enregistrement de mesures de grandeurs définies, ainsi que le stockage local des données, afin de sécuriser l'acquisition. Ils sont également chargés de les transmettre en temps réel à une passerelle, s'occupant de centraliser leurs données, et de les mettre à disposition. Par analogie avec les planètes et leurs satellites naturels, les kits de mesure ont été nommés « satellites », puisqu'ils gravitent en quelque sorte autour de la passerelle.

Les satellites sont des sous-systèmes indépendants, assignés à la mesure de grandeurs particulières. Pour le moment, trois ont été développés : le satellite Cyclopée, chargé de la mesure de niveau marin, et deux versions de valise multicapteurs, chargées de relever les caractéristiques de l'eau.

La détermination du niveau marin par Cyclopée consiste en la mesure du tirant d'air le séparant de la surface de l'eau, et du calcul de sa position GNSS. Ce principe développé et validé par Chupin et al. (2020)[4] permet, à partir des données recueillies de calculer le niveau marin.

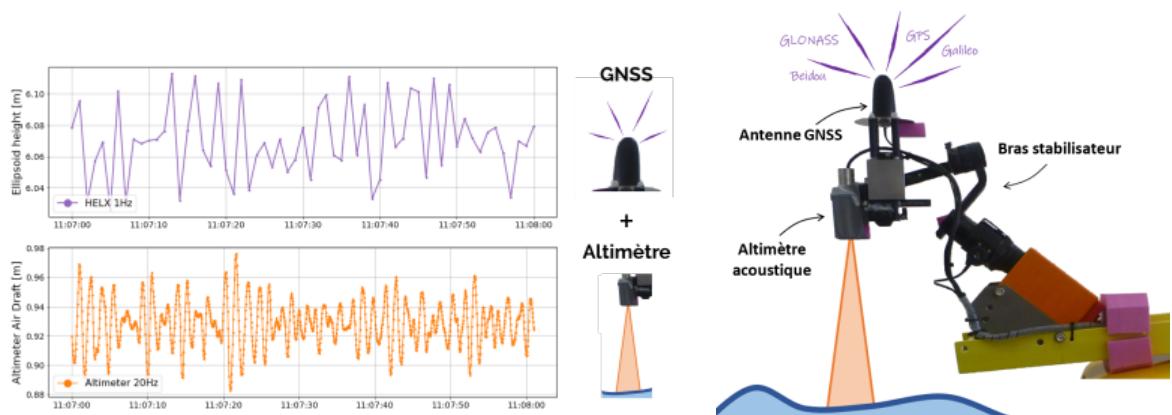


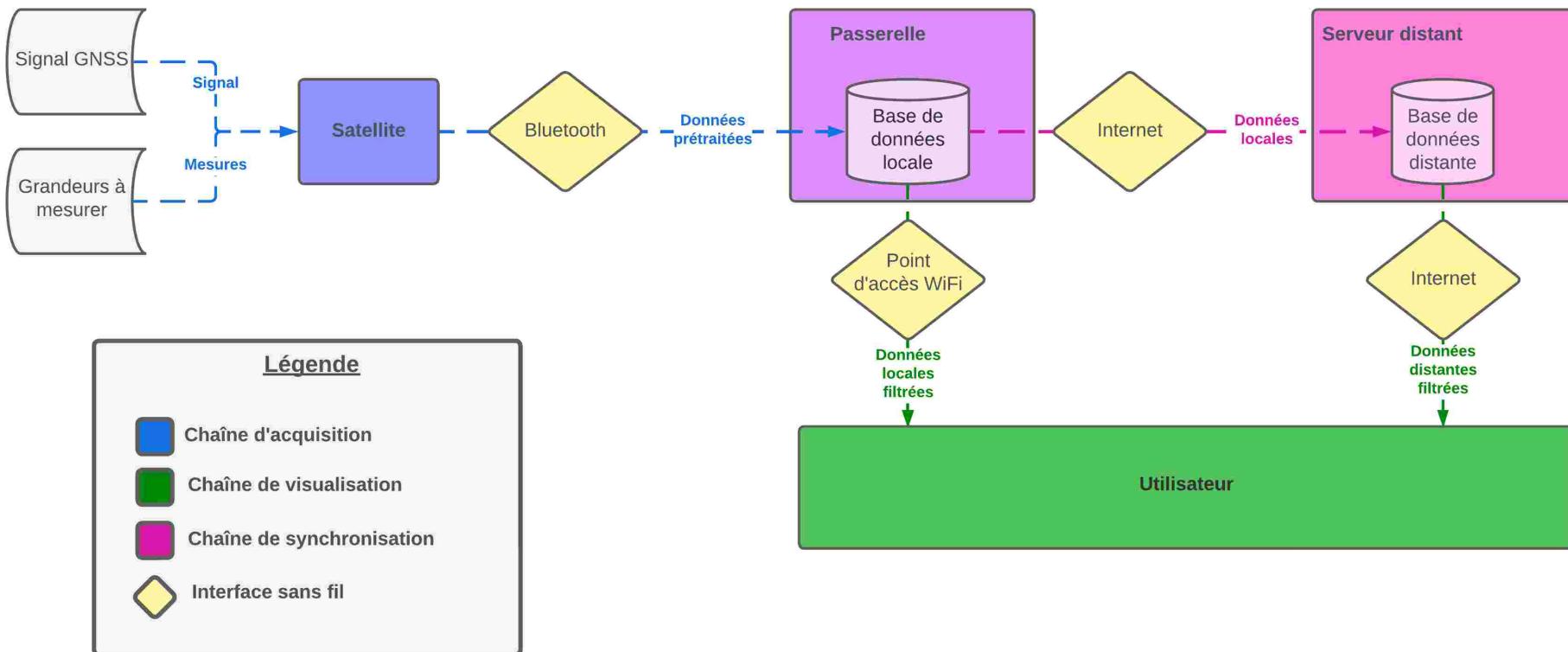
FIGURE 2.1 – Principe de fonctionnement de Cyclopée

La valise multi-capteurs est destinée à la mesure de plusieurs grandeurs. Elle embarquera donc différentes sondes. Pour répondre aux besoins du laboratoire, elle a principalement été développée pour le suivi de la qualité de l'eau. Deux versions ont été réalisées : la première, la plus bon marché, se charge des caractéristiques simples comme la température, la turbidité et la salinité ; et la seconde, prévue pour les grandeurs plus complexes comme les concentrations en oxygène, chlorophylle et le pH.

Le système se veut modulaire et assez flexible pour accepter des versions modifiées de ces satellites, ou bien de nouveaux n'ayant pas encore été imaginés.

La passerelle, de son côté, constitue l'élément central du système. C'est elle qui réalise le pont entre les données et les utilisateurs finaux. Elle enregistre les données des satellites en base de données, d'abord localement, puis décharge ses données sur un serveur distant connecté à internet, pour les rendre accessibles à la communauté de chercheurs.

Le diagramme de flux de la Figure 2.2 représente l'architecture globale du système satellites / passerelle. Chaque couleur représente un flux : le bleu pour la chaîne d'acquisition des données, le violet pour la chaîne de synchronisation et le vert pour la chaîne de visualisation. Chaque bloc représente un élément du système, et est coloré en fonction du flux auquel il participe le plus. Les satellites sont donc en bleu ; la passerelle et le serveur distant en nuances de violet, car ils stockent et synchronisent les données ; et enfin, l'utilisateur en vert.



Déroulement du stage

Le développement du projet a suivi un cycle en V[6] (cf. Figure 2.3). Il a donc été segmenté en plusieurs étapes, parfois associées au développement d'un sous-système. Elles sont au nombre de 6 : l'établissement de la gestion du projet, ne faisant pas partie du cycle, mais correspondant à la mise en place de son suivi ; la conception du système entier, correspondant aux phases d'exigences, d'analyse et de conception générale et détaillée ; le développement logiciel des sous-systèmes, faisant partie de la mise en œuvre ; l'assemblage, ayant permis de réaliser les tests d'intégration et système ; et finalement, les tests de fonctionnement, permettant de valider le résultat avant de le mettre en service. Une phase d'évaluation des capteurs du marché, indépendante du cycle de développement du projet, a également été ajoutée.

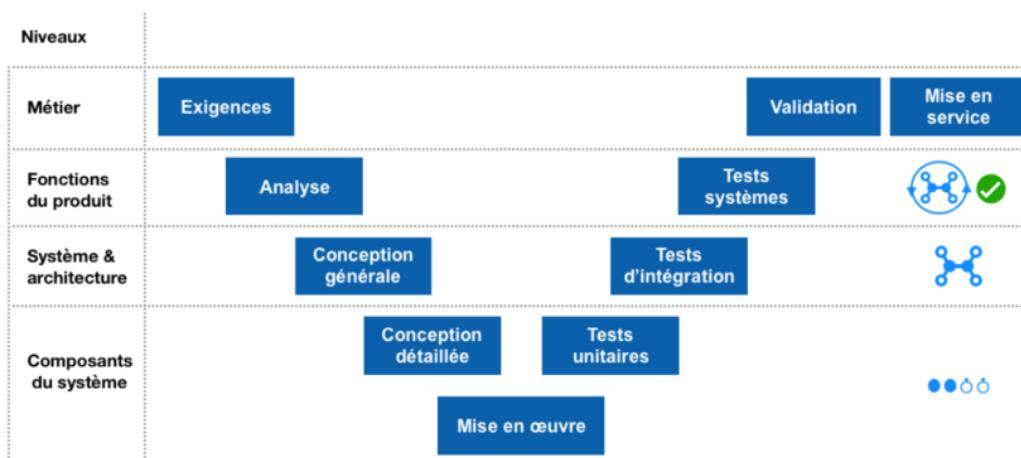


FIGURE 2.3 – Exemple de cycle en V

Ces phases sont ci-dessus énumérées dans un ordre logique optimal, mais n'ont en réalité pas suivi celui-ci pour différentes raisons. Plusieurs d'entre elles ont eu lieu en parallèle, notamment la définition du cahier des charges, qui n'a cessé de s'étoffer au fil du développement. Ma méconnaissance des outils mis à disposition sur Github a également retardé la mise en place d'un suivi de projet efficace sur le dépôt.

Le diagramme de Gantt Figure 2.4 synthétise l'agencement réel des grandes phases de travail du projet au cours du stage.

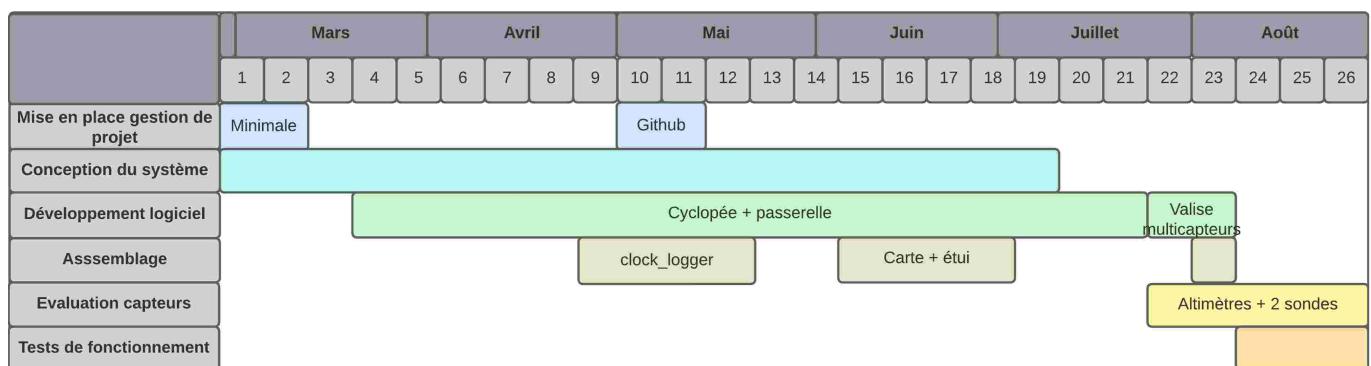


FIGURE 2.4 – Diagramme de Gantt

Chapitre 3

Conception du système

Ce chapitre présente la démarche suivie lors de la phase de conception du projet. Une analyse fonctionnelle externe a été menée afin de dresser le Cahier des Charges Fonctionnel du projet. Il a d'abord été réalisé à l'échelle du système, puis des sous-systèmes. Le choix des architectures des satellites et de la passerelle, inspirées du projet OceanIsOpen[13], ont ensuite permis de relever les contraintes internes lors de l'analyse fonctionnelle interne.

“Une image vaut mieux que mille mots”. Ce chapitre est l'occasion de le prouver, car il contient nombre de schémas et de tableaux synthétiques, extraits du CdCF (cf. Annexe A), couplés à de brèves explications expliquant la démarche.

3.1 Formulation des besoins

La première étape de l'analyse fonctionnelle externe fut l'identification des besoins. Elle consiste en la formulation des besoins primaires et techniques, auxquels devra répondre le système final. Le contexte introduit au chapitre 2.1 a permis de formuler le besoin primaire, qui donnera par la suite au système ses fonctions primaires, inscrites dans le CdCF. Une approche par projet a également permis de recenser les besoins techniques des chercheurs, afin de dimensionner le système à leurs attentes.

La principale raison de l'existence de ce projet est le manque de données environnementales dans la zone des pertuis Rochelais. Nous nous sommes interrogés sur les raisons de ce manque, et avons relevé que le coût des campagnes de mesure, et les difficultés rencontrées quant à la mise à disposition des données, constituent des freins à leur acquisition. Le besoin primaire auquel doit répondre le système a donc été formulé ainsi :

Récolter des séries temporelles de données environnementales à moindre coût sur un vaste territoire, et faciliter leur mise à disposition.

En plus du besoin primaire, un temps d'échange avec les chercheurs a permis d'identifier des besoins ou contraintes techniques auxquels le système doit répondre, afin de mener ses missions à bien au sein de leurs projets de recherche. Les différents projets recensés se concentrent sur deux thématiques : la mesure du niveau marin, et la mesure de la qualité de l'eau. Le Tableau 3.1 synthétise les informations recueillies lors de ce temps d'échange. Elles sont précieuses pour l'établissement du CdCF.

Projet	Site d'étude	Objectif	Mesurandes prioritaires	Mesurandes secondaires	Fréquence d'acquisition	Autonomie	Remarques
INRAE	Marais 10-50cm d'eau Végétation	Qualité de l'eau Biodiversité Niveau d'eau	GNSS Salinité Température	O ₂ pH Turbidité Chlorophylle	15min	Alimentation externe ?	Monitoring temps réel
SONEL	Plans d'eau (Per-tuis?)	Bouée de niveau marin Réflectométrie	GNSS	Température de l'air Préssion atmosphérique	10Hz < 1Hz	1 à 5 jours. Alimentation externe à bord.	Facilité de déploiement Monitoring temps réel. Stockage sur carte SD.
I. BRENON	Estuaires (Charente, Afrique)	Dynamique sédimentaire	Température Salinité Turbidité	Position GNSS Vagues	10-15min Mode burst (salve)	10 à 20 jours. Autonome	
RiOMar	Estuaire de la Charente	Etude de l'interface Charente / Mer.	O ₂ pH : ±0,01 Chlorophylle	Température Salinité Turbidité	1Hz	1/2 journée. Alimentation externe ?	Mesure dynamique
SONEL	Mer Océan Estuaire	Cartographie dynamique	Niveau marin	Température Pression atmosphérique ±0,1hPa	<1Hz	1 mois Alimentation externe à bord.	Embarqué à bord de navires. Cyclopée
Mathieu	Atlantique	Cartographie transatlantique	Niveau marin Température Salinité Turbidité		GNSS : 1Hz Sinon ≈30min	Le plus autonome possible.	Embarqué sur un voilier à travers l'Atlantique. Cyclopée
Aquarium Marais	8 bassins de pisciculture	Monitoring Pilotage	O ₂ Température Salinité Turbidité	pH	1h	Alimentation externe Déploiement permanent	Monitoring temps réel. Alarmes
	Toit du LIENSs	Quantifier la dérive sur de longues périodes	Niveau du bâtiment		Alimentation externe. Déploiement pendant 10 ans.		
Bouée pertuis			Niveau marin Météo	Température Salinité Turbidité	1Hz	Autonome	Transfert de données à distance

TABLE 3.1 – Synthèse des besoins techniques

À partir des besoins identifiés, le Cahier des Charges Fonctionnel a été rédigé afin de répertorier toutes les fonctionnalités que devra présenter le système pour y répondre entièrement.

3.2 Cahier des charges fonctionnel

Le Cahier des Charges Fonctionnel (cf. Annexe A) se présente comme une liste de fonctionnalités. Chacune d'elles doit être présente sur le système final afin de répondre aux besoins définis précédemment.

La qualité de la conception du système repose donc sur l'exhaustivité du CdCF. Si une fonctionnalité venait à manquer, le système final pourrait ne pas répondre entièrement aux besoins. Afin de ne pas en oublier, des méthodes prenant en compte les phases du cycle de vie, et les Eléments du Milieu Extérieur au système, ont été utilisées. Le projet s'appuyant sur plusieurs sous-systèmes, cette démarche a été appliquée à différentes échelles. Cette section présente les étapes de l'analyse fonctionnelle ayant mené au CdCF, en s'appuyant sur des extraits de celui-ci.

3.2.1 Le cycle de vie

Dans la méthode d'analyse fonctionnelle utilisée, l'identification des phases du cycle de vie constitue une étape importante. En effet, la vie du système ne se limite pas à son utilisation. Le projet étant *open source*, il sera assemblé par les utilisateurs eux-mêmes, ou des prestataires comme des *FabLabs*. Si sa facilité d'assemblage n'est pas prise en compte dès sa conception, il risque de ne pas être destiné au public cible. Cette étape permet donc d'envisager, de manière quasi exhaustive, les situations dans lesquelles le système peut se trouver, et ainsi remplir toutes les fonctionnalités attendues.

Pour les systèmes destinés à la production, le cycle de vie du produit comporte de nombreuses phases. Dans notre cas, nous nous sommes limités aux cinq suivantes, permettant d'appréhender l'évolution du système dans le temps. Pour améliorer la lisibilité du CdCF, elles ont été identifiées par une lettre.

L'assemblage (A) prend en compte l'installation logicielle, le montage, la protection contre les erreurs de montage, et le contrôle du bon fonctionnement du système fraîchement assemblé.

L'utilisation (U) consiste en l'installation sur le terrain, la mise en/hors service, et la période de fonctionnement du système.

La maintenance (M) comprend les réparations après usure ou endommagement du système.

Le stockage (S) correspond aux périodes pendant lesquelles le système n'est plus utilisé, mais doit rester fonctionnel en vue d'une utilisation future.

La fin de vie (F) débute lorsque le système entre en stockage définitif, et ne sera plus utilisé en tant que tel.

3.2.2 Les Eléments du Milieu Extérieur

Une fois le cycle de vie établi, l'identification des Eléments du Milieu Extérieur permet de recenser les interactions du système avec son environnement, pour chaque phase du cycle de vie.

Les EME identifiés durant les phases du cycle de vie sont les suivants :

L'utilisateur.	Le serveur.
Les grandeurs physiques à mesurer.	L'énergie apportée au système.
Le signal GNSS.	Le lieu d'utilisation.
Le <i>caster NTRIP Centipède</i> .	L'environnement marin.
Les mesures / données générées.	

Pour l'analyse fonctionnelle externe, un diagramme des interacteurs est réalisé pour chaque phase du cycle de vie, afin de visualiser les interactions du système avec les EME. Nous étant limités à un cycle de vie à cinq phases, nous avons pu toutes les rassembler en un seul diagramme.

Pour l'analyse interne, l'utilisation de BDFs a permis d'identifier les interactions entre composants. Ces méthodes ont été appliquées à l'échelle du système, puis de ses sous systèmes.

3.2.3 Le système

Les analyses fonctionnelles externe et interne à l'échelle du système ont permis de dresser un cahier des charges général, servant de base aux sous-systèmes, ainsi que d'identifier les interactions entre ceux-ci. Des méthodes d'identification graphiques, et supposant son architecture partiellement connue, ont été utilisées à ces fins.

Pour dresser le Cahier des Charges Fonctionnel du système entier, le diagramme des interacteurs de la Figure 3.1 a été réalisé, afin de visualiser les liens fonctionnels entre le système, et les EME l'entourant durant tout son cycle de vie. En tenant compte des besoins définis précédemment, ils ont pu être listés dans le Tableau 3.2, extrait du CdCF.

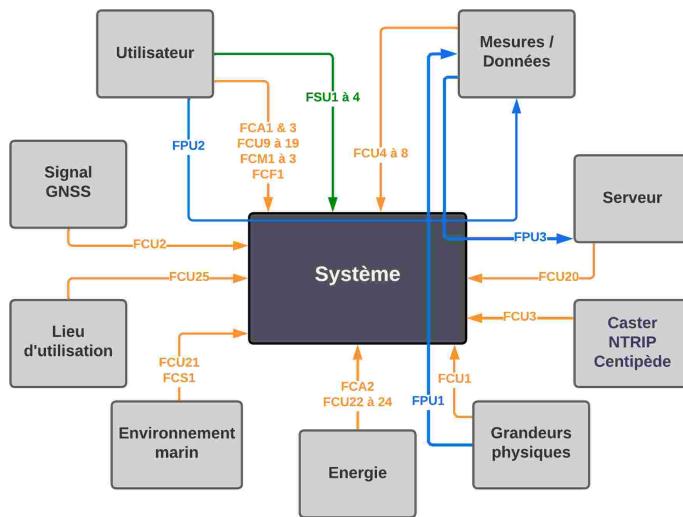


FIGURE 3.1 – Diagrammes des interacteurs système

En bleu, les fonctions principales ; en orange, les fonctions contraintes ; en vert, les fonctions de service ; en rouge, les fonctions techniques externes.

N°	Fonction	Critères	Niveaux
Fonctions Principales			
Phase d'utilisation (U)			
FP _{U1}	Générer des données environnementales en mesurant des grandeurs physiques.		
FP _{U2}	Rendre les données accessibles aux utilisateurs		
FP _{U3}	Mettre à disposition les données automatiquement.		
Fonctions Secondaires			
Phase d'utilisation (U)			
FS _{U1}	Permettre à l'utilisateur de commander le système à distance.		
FS _{U2}	Alerter l'utilisateur.		
FS _{U3}	Avoir différents modes de mesure.	Mesure ponctuelle Mode <i>burst</i>	
FS _{U4}	Être pratique.		
Fonctions Contraintes			
Phase d'assemblage (A)			
FC _{A1}	Être facilement assemblable par l'utilisateur.		
FC _{A2}	Être protégé en tension et courant.		
FC _{A3}	Permettre le contrôle du bon fonctionnement par l'utilisateur.		
Phase d'utilisation (U)			
FC _{U1}	Mesurer des grandeurs physiques.		
FC _{U2}	Pouvoir recevoir le signal GNSS.		
FC _{U3}	Être connecté au Centipède.	Connexion Internet Client NTRIP	
FC _{U4}	Géoréférencer les mesures.	Précision du positionnement	A définir par satellite...
FC _{U5}	Horodater les mesures.	Fréquence d'acquisition GNSS	A définir par satellite...
FC _{U6}	Stocker les données.		
FC _{U7}	Stocker une copie des données.		
FC _{U8}	Segmenter les données.		
FC _{U9}	Pouvoir lancer/stopper l'enregistrement des données.		
FC _{U10}	Avoir une période de segmentation réglable.		
FC _{U11}	Avoir une fréquence d'acquisition réglable.	Plage de fréquences	De 1h à 5Hz. A définir par satellite...
FC _{U12}	Permettre l'accès aux données.		
FC _{U13}	Permettre la visualisation des données.	Monitoring temps réel Fenêtre de temps modifiable	
FC _{U14}	Informer l'utilisateur de l'état du système.		

FC _{U15}	Être abordable.			
FC _{U16}	Être facile à installer.			
FC _{U17}	Être facile à mettre en service.			
FC _{U18}	Être facile à transporter.			
FC _{U19}	Être sans danger.			
FC _{U20}	Copier la base de données sur le serveur.	Connexion Internet		
FC _{U21}	Résister à l'environnement marin.	Indice de protection	IP67 minimum A définir par satellite...	
FC _{U22}	Avoir une bonne autonomie.	Durée d'autonomie Panneaux solaires	A définir par satellite... A définir par satellite...	
FC _{U23}	Pouvoir être alimenté extérieurement.			
FC _{U24}	Être mis sous/hors tension.			
FC _{U25}	S'adapter aux lieux d'utilisation.	Facilité d'utilisation en bateau.		
Phase maintenance (M)				
FC _{M1}	Nécessiter peu de maintenance.			
FC _{M2}	Être facilement réparable.	Facilité à changer les composants.		
FC _{M3}	Être facilement mis à jour.			
Phase de stockage (S)				
FC _{S1}	Résister à l'environnement marin.	Indice de protection pendant le stockage	IP67 minimum	
Fin de vie (F)				
FC _{F1}	Être démontable pour le tri.			

TABLE 3.2 – Besoins fonctionnels

Etant donné la variété de projets de recherche du Tableau 3.1, nous nous sommes tournés vers une architecture modulaire composée de satellites de mesure, gravitant autour d'une passerelle. Les différents kits proposeront des réponses sur mesure aux projets des chercheurs ; et la passerelle, une solution sans fil à la mise à disposition et l'accès aux données.

L'aspect externe de l'analyse fonctionnelle du système étant terminée, et ayant déjà imaginé l'architecture passerelle / satellites, sa partie interne a pu être menée. La méthode utilisée a encore une fois été graphique, et a permis d'identifier les besoins fonctionnels existants entre passerelle et satellites. La Figure 3.2 présente le Bloc Diagramme Fonctionnel du système conçu, afin d'illustrer cette démarche. Les fonctions techniques externes y figurant permettent de compléter les différentes chaînes créées par les fonctionnalités relevées précédemment. Elles s'expriment différemment pour chaque sous-système, et seront donc détaillées dans leur section respective.

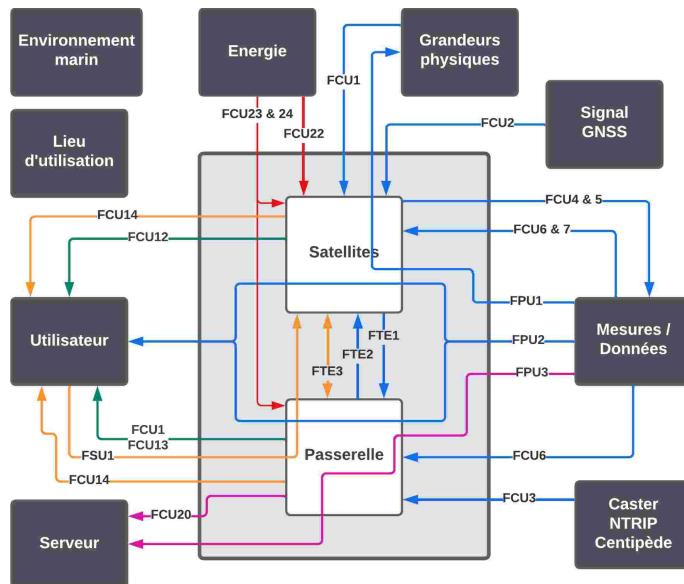


FIGURE 3.2 – Bloc Diagramme Fonctionnel du système

En bleu, la chaîne d'acquisition ; en orange, la chaîne de commande ; en vert, la chaîne de visualisation ; en rouge, la chaîne d'énergie ; en violet, la chaîne de synchronisation.

3.2.4 Les satellites

Les satellites sont à la base de la chaîne d'acquisition. Ils constituent des solutions particulières, adaptées aux besoins des projets de recherche, pour générer des données. Malgré le nombre de projets recensés, nous avons pu regrouper les mesurandes apparaissant le plus souvent ensemble, et imaginer un nombre restreint de satellites. Avant de rentrer dans le détail de ceux-ci, voyons d'abord plus en profondeur quelles sont les fonctions d'un satellite au sein du système, et les choix technologiques permettant leur implémentation. Les mêmes méthodes graphiques que précédemment ont été appliquées à leur échelle.

Le rôle des satellites est d'enregistrer des mesures de grandeurs physiques, et de les communiquer à la passerelle. À noter qu'ils peuvent très bien fonctionner de manière isolée, sans cette dernière, et simplement enregister les données localement. Les fonctions que doit présenter le système ayant déjà été recensées, leur cahier des charges est constitué que d'une partie de celles-ci. Afin de ne pas surcharger ce rapport de tableaux, le diagramme des interacteurs Figure 3.3 résume les spécifications d'un satellite. Le détail des fonctions y figurant peut être trouvé dans le Tableau 3.2, à l'exception des fonctions techniques externes, décrites dans le Tableau 3.3 et en Annexe A.

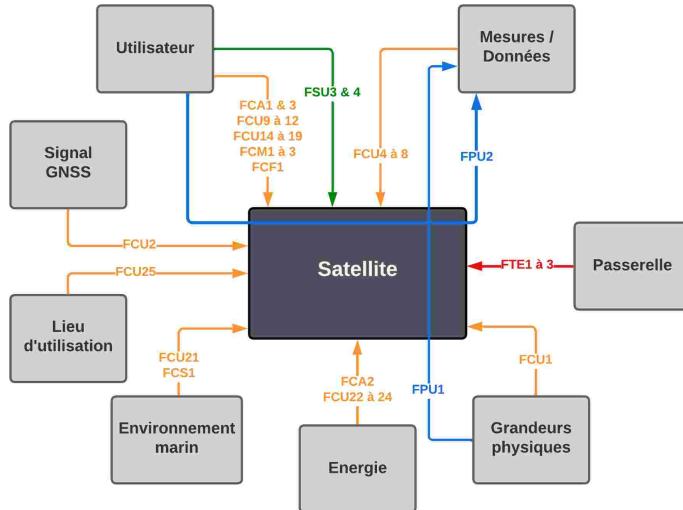


FIGURE 3.3 – Diagramme des interacteurs d'un satellite

En bleu, les fonctions principales ; en orange, les fonctions contraintes ; en vert, les fonctions de service ; en rouge, les fonctions techniques externes.

Pour implémenter toutes ces fonctionnalités, nous nous sommes tournés vers une architecture inspirée du projet OceanIsOpen[13]. Elle est basée sur un microcontrôleur PJRC Teensy 3.5, proposant de nombreuses liaisons séries UART, nécessaires aux périphériques ci-après mentionnés. Sa mission est de lire les mesures de capteurs, de les horodater et géoréférencer, et de les transmettre pour stockage. Chaque satellite est actuellement prévu pour piloter trois sondes. Elles dépendent des grandeurs physiques à mesurer et seront abordées plus loin, dans le détail des satellites imaginés. Le choix du périphérique de stockage des données s'est porté vers une carte SD, dont le support est déjà présent du Teensy 3.5. Les mesures devant être horodatées et géoréférencées, un espace pour un récepteur GNSS muni d'une antenne a été prévu. La transmission des données finales est réalisée par un module Bluetooth permettant d'atteindre des vitesses de communication et une portée suffisantes, tout en préservant l'autonomie du satellite, et en restant facilement accessible par la passerelle. Côté énergie, nous avons prévu un module abaissageur de tension protégé en courant, adaptant une tension d'entrée fournie par une batterie, ou bien une source externe, en 5V. Un interrupteur permet de mettre le système sous/hors tension. L'étui marinisé permet de protéger les équipements des conditions marines.

Tous ces composants peuvent être retrouvés sur le BDF des satellites Figure 3.4. Les fonctions techniques, représentant leurs interactions à l'intérieur du sous-système, sont décrites dans le Tableau 3.4.

Le cadre général étant maintenant établi, nous pouvons nous tourner vers les satellites concrets, conçus pour répondre aux besoins particuliers des projets de recherche. Ils sont au nombre de

N°	Fonction	Critères	Niveaux
Fonctions Techniques Externes (E)			
FT _{E1}	Envoyer les données sans fil à la passerelle.	Vitesse de communication Portée	... 10m
FT _{E2}	Recevoir les corrections RTK de la passerelle.		
FT _{E3}	Exécuter les ordres de la passerelle.		

TABLE 3.3 – Fonctions techniques externes des satellites

N°	Fonction	Critères	Niveaux
Fonctions Techniques			
Phase d'utilisation (U)			
FT _{U1.1}	Lire les mesures de capteurs.		
FT _{U1.2}	Transmettre le signal GNSS au module GNSS.		
FT _{U1.3}	Acquérir la position et le temps GNSS.		
FT _{U1.4}	Transférer les corrections RTK au module GNSS.		
FT _{U1.5}	Ecrire les données sur la carte SD.		
FT _{U1.6}	Interrompre l'enregistrement des données.		
FT _{U1.7}	Envoyer les données au module Bluetooth.		
FT _{U2}	Recevoir / Envoyer les ordres / réponses au module Bluetooth.		
FT _{U3.1}	Alimenter et protéger tous les composants.		
FT _{U3.2}	Mettre sous/hors tension.		
FT _{U3.3}	Relier la batterie au module d'alimentation.		

TABLE 3.4 – Fonctions techniques des satellites

N°	Fonction	Critères	Niveaux
Fonctions Contraintes			
Phase d'utilisation (U)			
FC _{U4}	Géoréférencer les mesures.	Précision du positionnement	1cm voire 1mm
FC _{U5}	Horodater les mesures.	Fréquence d'acquisition GNSS	5Hz
FC _{U10}	Avoir une fréquence d'acquisition réglable.	plage de fréquences	15min à 5Hz.
FC _{U20}	Résister à l'environnement marin.	Indice de protection	IP67 minimum
FC _{U21}	Avoir une bonne autonomie.	Durée d'autonomie Panneaux solaires	Le plus autonome possible. Idéalement 5 jours à fréquence d'acquisition élevée.

TABLE 3.5 – Niveaux de satisfaction du satellite Cyclopée

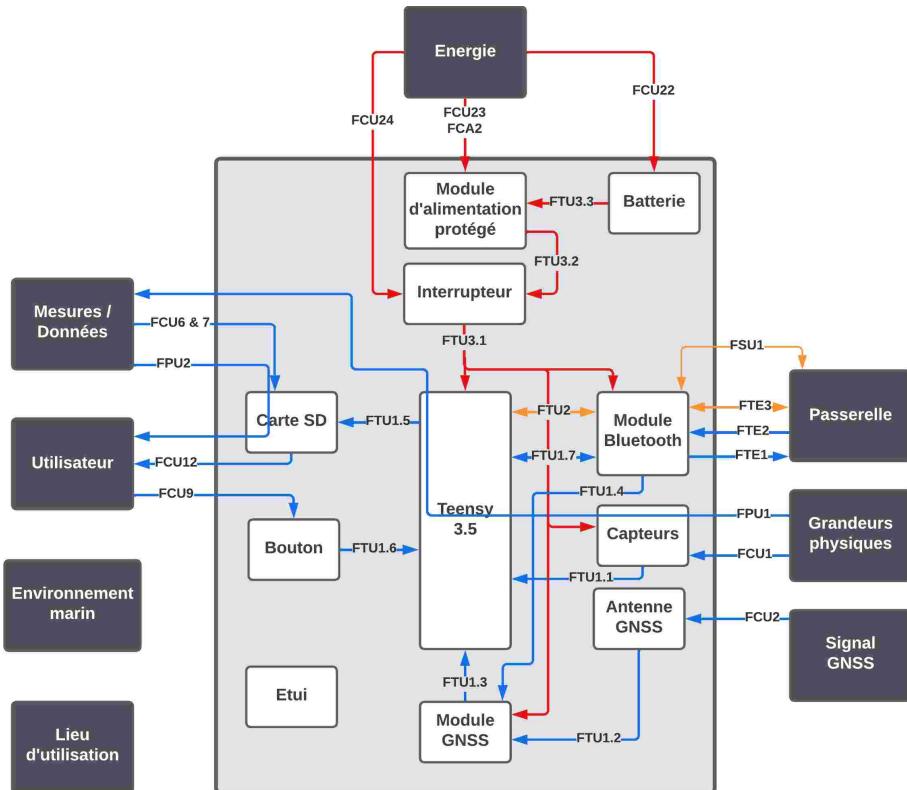


FIGURE 3.4 – Bloc Diagramme Fonctionnel des satellites

En bleu, la chaîne d'acquisition ; en orange, la chaîne de commande ; en rouge, la chaîne d'énergie.

deux : le satellite Cyclopée et la valise multicapteurs.

Cyclopée

Le satellite Cyclopée est chargé de la mesure du niveau marin à bord d'embarcations. Son principe de fonctionnement^[4] repose sur la mesure de sa distance à la surface de l'eau, qui combinée avec une position GNSS précise, permet de calculer la hauteur du niveau de la mer. Les travaux de Tempère A.^[12] ont mis en évidence l'influence du rayonnement solaire sur les altimètres acoustiques autocompensés en température. Nous avons donc décidé d'intégrer un capteur de température au satellite, afin de confronter son évolution aux distances mesurées, et de réaliser une compensation externe pour les capteurs le permettant. Le Tableau 3.1 rassemble les niveaux de satisfaction des fonctions du CdCF restées vagues (cf. Tableau 3.5).

Les capteurs utilisés par ce satellite sont donc : un altimètre ultrasonore, mesurant le tirant d'air entre la sonde et la surface de l'eau ; et un capteur de température constituant une source externe pour la compensation de température. Un module GNSS précis de type U-Blox ZED-F9P ou Septentrio Mosaic est nécessaire pour un positionnement précis en RTK.

La valise multi-capteurs

La valise mutlicapteurs est dédiée à la mesure des caractéristiques de l'eau. Elle est disponible sous deux versions différentes. La première, la plus bon marché, se chargera des mesures simples de qualité d'eau, à savoir la température, turbidité et salinité. La seconde, sera dédiée aux grandeurs plus complexes comme le pH, l'oxygène dissout et la chlorophylle.

Tout comme le satellite Cyclopée, elle a ses propres niveaux de satisfaction, présentés dans le

Tableau 3.6.

N°	Fonction	Critères	Niveaux
Fonctions Contraintes			
Phase d'utilisation (U)			
FC _{U4}	Géoréférencer les mesures.	Précision du positionnement	< 10m
FC _{U5}	Horodater les mesures.	Fréquence d'acquisition GNSS	1Hz
FC _{U10}	Avoir une fréquence d'acquisition réglable.	plage de fréquences	1h à 1Hz.
FC _{U20}	Résister à l'environnement marin.	Indice de protection	Sondes IP68 minimum IP67 minimum
FC _{U21}	Avoir une bonne autonomie.	Durée d'autonomie Panneaux solaires	Le plus autonome possible

TABLE 3.6 – Niveaux de satisfaction de la valise multi-capteurs

3.2.5 La passerelle

La passerelle est l'élément central du système. C'est elle qui réalise le pont entre les données et les utilisateurs finaux. Elle est accessible sans fil, et enregistre les données des satellites en base de données localement, et sur un serveur distant connecté à internet. Elle permet également de commander les satellites, dans une certaine mesure.

Comme pour ces derniers, son Cahier des Charges Fonctionnel est constitué de la partie restante des fonctions indentifiées à l'échelle du système. Le diagramme des interacteurs Figure 3.5 et les fonctions techniques externes du Tableau 3.7 permettent de les résumer visuellement.

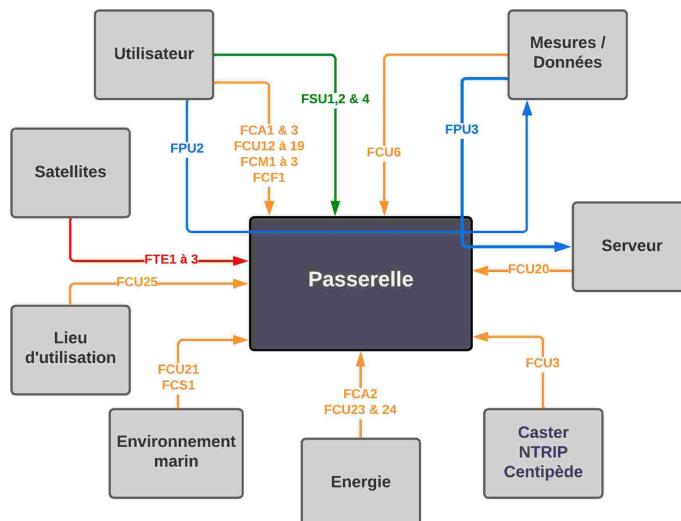


FIGURE 3.5 – Diagramme des interacteurs de la passerelle

En bleu, les fonctions principales ; en orange, les fonctions contraintes ; en vert, les fonctions de service ; en rouge, les fonctions techniques externes.

La passerelle est globalement constituée de cartes réseau sans fil, et de briques logicielles, hébergées sur un Raspberry Pi. Ces ordinateurs miniatures étant tous relativement puissants, plusieurs modèles de la gamme peuvent être utilisés pour ce sous-système.

En termes de télécommunications, les Raspberry Pi sont équipés de cartes Bluetooth et WiFi, permettant respectivement la communication des données et des ordres avec les satellites ; et la

création d'un point d'accès pour visualiser les données localement, ainsi qu'une connexion internet pour la synchronisation des données sur le serveur, et la récupération des corrections RTK depuis les serveurs Centipède. N'ayant pas toujours de réseau WiFi à proximité, la passerelle est également équipée d'une clé 4G, étendant ainsi la portée de synchronisation des données.

Inspirée du projet OceanIsOpen[13], les briques logicielles comprennent un serveur PostgreSQL accueillant la base de données locale ; un serveur Node-RED assurant le transit des données et des ordres entre passerelle et satellites ; une IHM permettant le contrôle de ces derniers ; un serveur Grafana utilisé pour visualiser les données stockées sous forme de cartes et de graphiques ; et un client NTRIP permettant de récupérer les corrections RTCM3 depuis internet.

Ce sous-système sera le plus énergivore, c'est pourquoi nous n'avons pas prévu de le faire fonctionner de manière autonome. Il est dépendant d'une source d'énergie qui peut être trouvée à bord d'une embarcation telle qu'un voilier de plaisance, une vedette de passagers ou un navire océanographique.

Les interactions entre tous ces composants sont détaillées dans la Figure 3.6 et le Tableau 3.7.

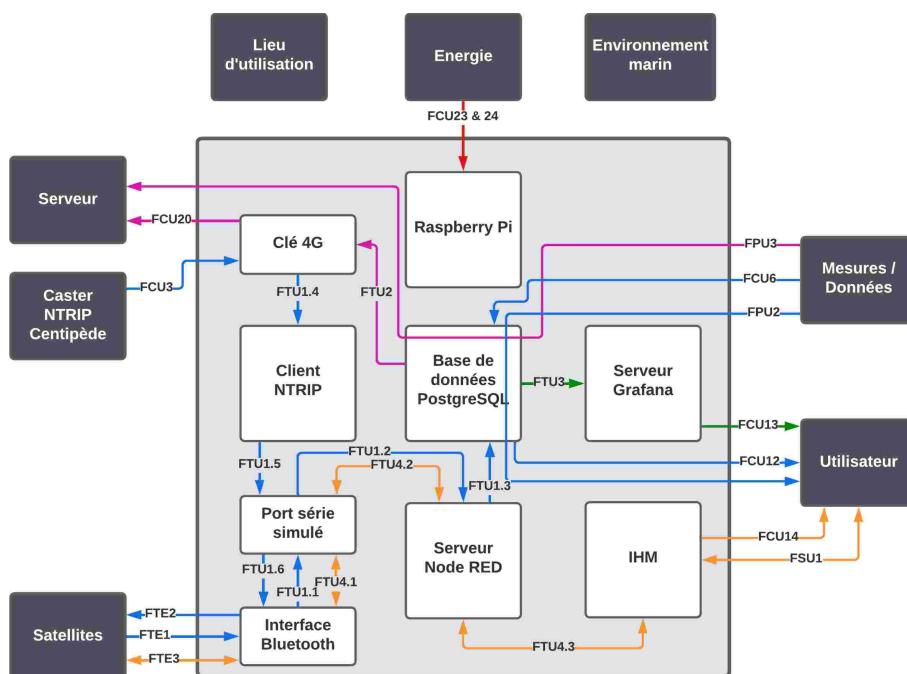


FIGURE 3.6 – Bloc Diagramme Fonctionnel de la passerelle

En bleu, la chaîne d'acquisition ; en orange, la chaîne de commande ; en vert, la chaîne de visualisation ; en rouge, la chaîne d'énergie ; en violet, la chaîne de synchronisation.

C'est avec l'établissement du CdCF de la passerelle que s'est achevée la phase de conception du projet. La présentation de celle-ci dans ce rapport étant extensive et subdivisée, un diagramme des flux du système (Figure 3.7), permet de le visualiser dans son ensemble.

N°	Fonction	Critères	Niveaux
Fonctions Techniques			
Phase d'utilisation (U)			
FT _{U1.1}	Transférer les données Bluetooth au port simulé.		
FT _{U1.2}	Lire les données sur le port série simulé.		
FT _{U1.3}	Ecrire les données en base de données.		
FT _{U1.4}	Transférer les corrections RTK au port série simulé.		
FT _{U1.5}	Transférer les corrections RTK à l'interface Bluetooth.		
FT _{U2}	Envoyer la copie de la base de données sur Internet.		
FT _{U3}	Lire et afficher les données à l'utilisateur.		
FT _{U4.1}	Envoyer / Recevoir les ordres / réponses à l'interface Bluetooth.		
FT _{U4.2}	Envoyer / Recevoir les ordres / réponses au port série simulé.		
FT _{U4.3}	Envoyer / Recevoir les ordres / réponses à l'IHM.		

TABLE 3.7 – Fonctions techniques de la passerelle

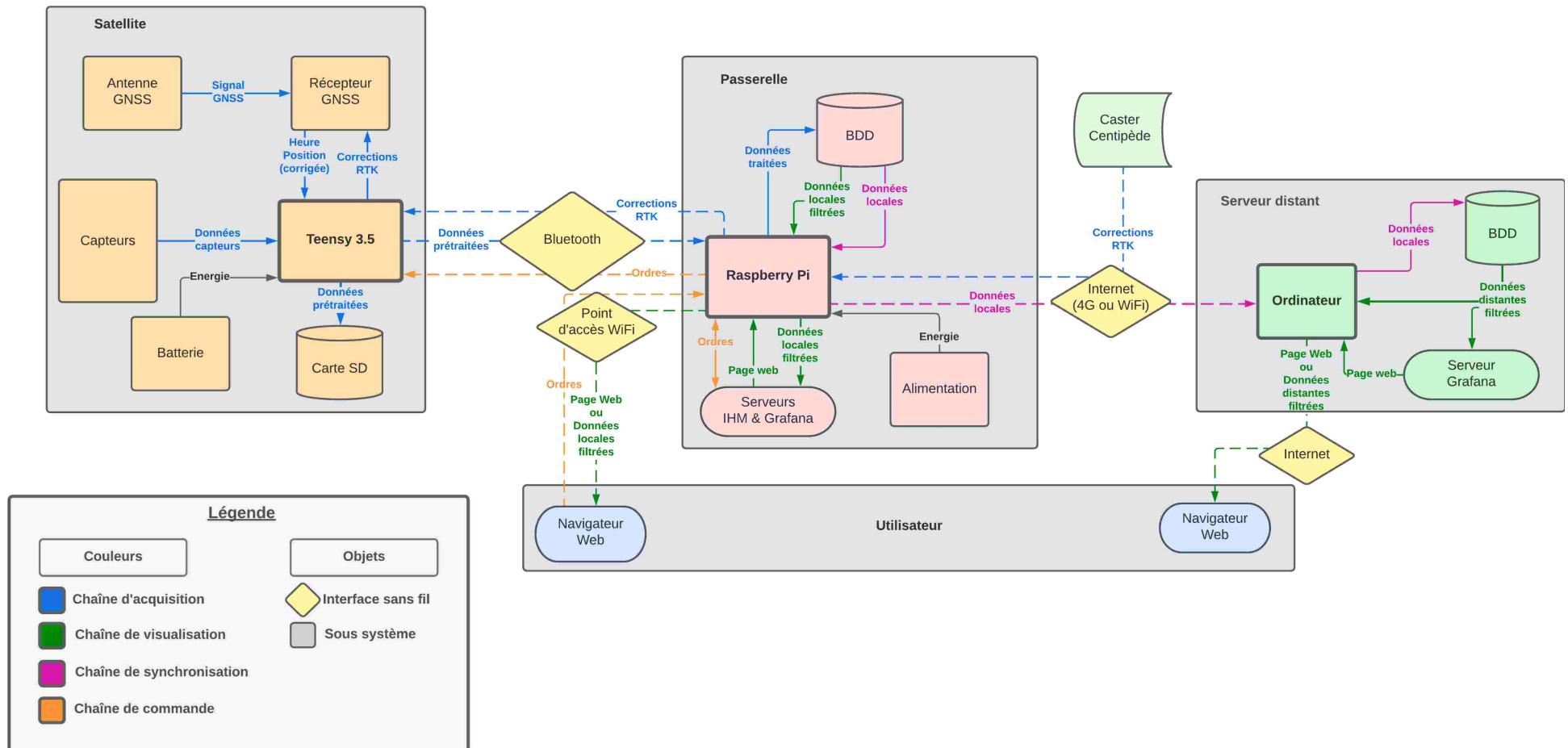


FIGURE 3.7 – Diagramme des flux du système

Chapitre 4

Gestion du projet

Ce projet comprend beaucoup de développement informatique collaboratif et *open source*. Nous nous sommes naturellement tournés vers le logiciel Git et la plateforme en ligne Github pour gérer son développement et ses versions.

N'étant pas familier avec ces outils, ce stage a donc été l'occasion de m'y former. Les versions de ce rapport, rédigé en \LaTeX , ont d'ailleurs été gérées par Git.

Ce chapitre présente donc la gestion et l'organisation des dépôts Git et Github du projet.

4.1 Dépôt Git et Github

S'agissant d'un projet de développement informatique collaboratif, il est important de mettre en place une gestion de ses versions efficace, afin de développer collaborativement de manière sécurisée. Des dépôts Git et Github ont été mis en place afin de réaliser ce travail de traçabilité.

Git est un logiciel de gestion de versions de projets très connu, développé par le non moins célèbre, Linux Trovalds, créateur du noyau Linux. Les projets y sont représentés sous forme de dépôts (dossiers) de fichiers, dont le logiciel retrace les modifications.

De son côté, Github est une plateforme de stockage et de développement de projets en ligne, basée sur l'utilisation de Git, et proposant d'autres fonctionnalités facilitant le développement informatique. Elle stocke donc des dépôts Git, et permet de travailler collaborativement sur internet.

Nous avons donc décidé de créer un dépôt sur Github, nommé `MultiProbeCase`, organisé comme le montre la Figure 4.1.

Les dossiers des satellites sont nommés par leur nom, suivi de `_sat`. Ils contiennent les tests unitaires, développés pour tester les périphériques ; les bibliothèques nécessaires à la compilation du code source, et les modules des capteurs ; les versions avec et sans GNSS du programme ; ainsi qu'un fichier de description `README.md`.

Le dossier `gateway` de la passerelle contient les scripts d'installation des briques logicielles, leur fichier de configuration, ainsi que les instructions d'installation.

Enfin, le dossier `docs` comprend toute la documentation du projet, allant du cahier des charges, au manuel utilisateur.

Cette architecture pourrait être plus modulaire, mais le code source reposant pour l'instant sur des variables globales à partager entre fichiers, nous avons rencontré des difficultés à totalement éviter la duplication de code. Une des améliorations prévues concerne la création de classes pour les capteurs, et devrait permettre de nous affranchir de ce problème.

4.2 Suivi du projet

Github propose également des fonctionnalités de gestion de projet, comme la création d'emplois du temps, et de tâches à effectuer (appelées *issues*). Ces dernières permettent de réaliser une traçabilité du projet, en détaillant comment elles ont été réalisées, et ce qu'il reste à faire. Nous nous sommes donc appuyés sur ces fonctionnalités pour réaliser la gestion du projet. Elle

```
MultiProbeCase/
|-- satelliteName_sat/
|   |-- libraries/
|   |   |-- sensor_modules/
|   |   |-- ...
|   |-- unit_tests/
|   |-- clock_logger/
|   |-- GNSS_logger/
|   |-- README.md
|-- gateway/
|   |-- module_config.json
|   |-- module.sh
|   |-- install.sh
|   |-- instructions.md
|-- documentation/
|   |-- functional_specs.pdf
|   |-- ...
|   |-- user_maual.pdf
```

FIGURE 4.1 – Architecture du dépôt Git

se présente sous forme d'une liste de tâches, celles-ci pouvant être filtrées comme souhaité. La Figure 4.2 présente le filtre par sous-système ou sous-projet. D'autres types de filtres prédéfinis sont disponibles dans les différents onglets en haut du tableau.

Le dépôt Github est accessible [ici](#). Son onglet **Projects** donne accès à la gestion de projet.

jancelin / Projects / MPC Project Progress

Type to search | | | | | |

MPC Project Progress

Subprojects Urgent tasks In Progress tasks All tasks + New View

Filter by keyword or by field

Title	Status	Priority	Deadline	Assignees	Start week
Cyclopée 21					
1 10Hz logger	Todo	Not urgent		DeGaMon	Week 26
2 JSON configuration file	Todo	Not urgent		DeGaMon	Week 26
3 Library to gather data buffers	Todo	Not urgent		DeGaMon	Week 26
4 URM14 Modbus timeout	Todo	Not urgent		DeGaMon	Week 26
5 Measurement loss when segmen...	Todo	Not urgent		DeGaMon	Week 26
6 Fix Nan format	Done			DeGaMon	Week 23
7 Write sensor modules	Done			DeGaMon	Week 21
8 No logging if no GNSS time #6	Done			DeGaMon	Week 18
9 Clock_logger timestamp conv... #5	Done			DeGaMon	Week 15
10 Casing conception #3	Done			DeGaMon	Week 13
11 Fix LED UI irregular blinks #4	Done			DeGaMon	Week 11
12 Bluetooth communication	Done			DeGaMon	Week 10
13 Consumption optimisation #2	Stand by	Not urgent		DeGaMon	Week 9
14 Create LED user interface	Done			DeGaMon	Week 8
15 Add button to start/stop logging	Done			DeGaMon	Week 7
16 Create GNSS logger	Done			DeGaMon	Week 6
17 Create Clock logger	Done			DeGaMon	Week 5
18 SD card logging	Done			DeGaMon	Week 4
19 Log buffers	Done			DeGaMon	Week 4
20 Distance measuring	Done			DeGaMon	Week 3
21 Temperature measuring	Done			DeGaMon	Week 3
+ Add item					
MultiProbeCase 2					
22 Build functionnal water tight MPC	Done			DeGaMon	Week 23
23 Make a clock_logger version of si...	Done			DeGaMon	Week 22
+ Add item					
Gateway 6					
24 severjs cleanup	Todo	Not urgent		DeGaMon and Ro...	Week 26
25 Implement Bluetooth service	Stand by	Not urgent		DeGaMon, jancel...	Week 13
26 Design database	Done			jancelin	Week 12
27 Project proof of concept	Done			DeGaMon, jancel...	Week 11
28 Gateway set up	Done			DeGaMon and Ro...	Week 7
29 Study OceanisOpen gateway	Done			DeGaMon	Week 3
+ Add item					
Doc 3					
30 Update RS485 interface	Todo	Not urgent		DeGaMon	Week 26
31 (Re)Write and code unit tests	Todo	Not urgent		DeGaMon	Week 26
32 Reorganise specifications	Stand by	Not urgent		DeGaMon	Week 13
+ Add item					
Sensor evaluation 3					
33 Altimeters evaluation	In Progress		Aug 25, 2023	DeGaMon	Week 21
34 Interface JSON SR04T sensor	Done		Jun 9, 2023	DeGaMon	Week 15
35 Test bench logger	Done		Jul 3, 2023	DeGaMon	Week 14
+ Add item					

FIGURE 4.2 – Aperçu de la gestion du projet

Chapitre 5

Développement logiciel

Ce chapitre détaille la conception et le développement logiciel des satellites et de la passerelle. Il est entendu par logiciel, le programme s'exécutant sur le microcontrôleur des satellites, ainsi que l'installation et la communication entre les différentes briques logicielles de la passerelle. Etant seul sur la programmation du satellite Cyclopée, il a constitué la majeure partie du stage, et a servi de base aux autres satellites. De son côté, la passerelle a été conçue en parallèle de ce dernier, collaborativement avec Julien Ancelin, administrateur du réseau Centipède[2], et à l'origine du projet Physalia[3] ; et Romain Tourte, concepteur du projet OceanIsOpen[13]. Ayant peu d'expérience dans les technologies utilisées, le développement s'est déroulé de manière cyclique, alternant prise en main du matériel et intégration dans le code source. Le projet est en constante amélioration, la version du système présentée n'est donc pas définitive et est vouée à évoluer. Les perspectives de développements futurs envisagées sont mentionnées pour chaque sous-système.

5.1 Les satellites

Le développement des satellites a représenté une grande partie du stage. Ils ont été conçus sur une base commune, celle du satellite Cyclopée, premier à voir le jour. Le choix de développer ce dernier en priorité n'a pas été arbitraire. Il s'agit du sous-système le plus exigeant en termes de fréquence d'acquisition et d'autonomie. Il nous a donc permis d'identifier les limites techniques du matériel utilisé. De plus nous avions dès le début du stage le matériel nécessaire à sa réalisation. Pour rappel, les satellites s'articulent autour du microcontrôleur PJRC Teensy 3.5, sur lequel viennent se greffer des capteurs, un récepteur GNSS, une carte SD, et un module Bluetooth. Avant de commencer à programmer les satellites, un état de l'art des projets existants a été réalisé. Leur programmation a été effectuée en langage C++, avec la suite de développement Arduino. N'étant pas familier avec la programmation Arduino et le Teensy 3.5, la conception et le développement du programme se sont déroulés en parallèle. Les découvertes et freins identifiés lors du développement ont alimenté la réflexion sur ce dernier.

5.1.1 Etat de l'art

Cette section résume les différents projets étudiés afin d'identifier les schémas de conception intéressants pour le programme des satellites. Trois projets ont été retenus pour comparaison : le projet SensOcean[5], le datalogger SETIER[11], et la malette OceanIsOpen[13].

SensOcean est un boîtier autonome de mesure de température et salinité de l'eau de mer, ainsi que de la température et pression atmosphérique. Il fonctionne par cycles de mesures dont la période de déclenchement peut être configurée. Le reste du temps, le boîtier est en veille. Après chaque cycle de mesure, les données sont affichées sur un écran et enregistrées sur une carte SD. Il fonctionne sur batterie et se recharge seul grâce à un panneau solaire.

Le fonctionnement de SensOcean est proche de celui de SETIER. Il effectue des cycles de mesure à une fréquence configurable (choix limités). Son panel de sondes est cependant plus varié. Il permet également de déclencher et visualiser des mesures, de télécharger les données mesurées et de rentrer les coefficients de calibration depuis une page HTML, via son point d'accès WiFi. Son alimentation est uniquement externe.

Le projet OceanIsOpen est le plus complet des trois. En plus d'une station de mesure, il compte aussi un système de stockage et mise à disposition des données sophistiqué. Cette station de mesure effectue des acquisitions périodiques, de fréquence paramétrable, pour stockage temporaire local sans jamais entrer en veille. Le système de stockage peut être séparé en deux parties, le stockage local (sur la station) et distant (sur un serveur distant). Sur la station, les acquisitions sont envoyées dans une base de données PostgreSQL, qui les stocke avec leurs métadonnées (date, heure et position GNSS). Ces données sont accessibles via le point d'accès WiFi embarqué de la station. Une application web et un serveur Grafana permettent de gérer et visualiser les données locales. Elles sont ensuite envoyées pour stockage vers un serveur PostgreSQL distant grâce à un accès à internet fourni par une carte SIM. De ce serveur accessible depuis internet, elles peuvent être extraites et utilisées.

Une synthèse de ces projets a été rédigée et est disponible en Annexe B, dont le Tableau 5.1 est extrait. Cette étude a porté peu de fruits, mais a néanmoins servi d'exemple d'utilisation de l'endormissement des microcontrôleurs.

	SensOcean	SETIER Datalogger	OceanIsOpen
Alimentation	Batterie	Secteur	Batterie
Recharge	Secteur	Solaire	Secteur
Mise en veille	Oui	Oui	Non
Date/Heure	Horloge	Horloge	Temps GNSS
Accès aux données	Carte SD	SD	WiFi et Internet, WiFi et SD
Visualisation	Ecran (temps réel) et post traitement	Post traitement	Grafana (local ou distant)
Signalisation LED	Oui	Non	Non
Ecran	Oui	Non	Oui
Aide à la calibration	+	++	+++

TABLE 5.1 – Synthèse de projets existants.

5.1.2 Conception

Avant de rentrer dans la phase de développement, l'architecture du programme a été imaginée en amont pour assurer une réponse exhaustive au CdCF des satellites (cf. Annexe A). Elle participe à l'implémentation de la majorité des fonctions listées pour ces sous-systèmes. Cyclopée ayant été choisi comme le premier satellite à développer, le programme a également été conçu pour répondre à ses exigences (cf. Tableau 3.5).

L'architecture a été imaginée de manière très différente des projets étudiés (cf. Section 5.1.1). Elle a été abordée à travers les prismes de la programmation temps réel et événementielle. A noter que le microprocesseur ARM Cortex M4 du Teensy 3.5 ne possède qu'un seul cœur, ce qui a éliminé toute possibilité de multitraitements.

Pour ce sous-système, la périodicité des mesures est un enjeu majeur. Les exigences de Cyclopée spécifient une fréquence d'acquisition allant jusqu'à 10Hz, ce qui implique une gestion du temps précise. De plus, l'importance de l'horodatage des mesures pour correctement les qualifier a donc orienté la conception vers un système temps réel préemptif, utilisant des tâches interrompant périodiquement l'exécution d'autres processus. Pour réaliser un tel système, plusieurs solutions ont été explorées.

Tout d'abord, l'installation d'un système d'exploitation temps réel a été envisagée. Pour un microcontrôleur léger comme le Teensy 3.5, il en existe peu. Un portage de FreeRTOS à néanmoins

été trouvé, mais cette option a rapidement été écartée, au vu de la complexité de la programmation. Le système étant destiné à des utilisateurs peu familiers avec cette approche, mais amenés à modifier le programme, nous avons jugé plus pertinent de rester dans l'univers simple et déjà très documenté d'Arduino.

Compte tenu du microprocesseur monocœur du Teensy, nous nous sommes documentés sur la bibliothèque TeensyThreads, permettant de réaliser du *multithreading*, en utilisant un algorithme d'ordonnancement de type *Round-robin* (cf. Figure 5.1). Cette solution ne permet pas de planification rigoureusement périodique de l'exécution des tâches. Elle n'a donc pas été considérée. L'architecture logicielle repose sur celle d'un projet Arduino. Elle s'articule autour d'une fonction

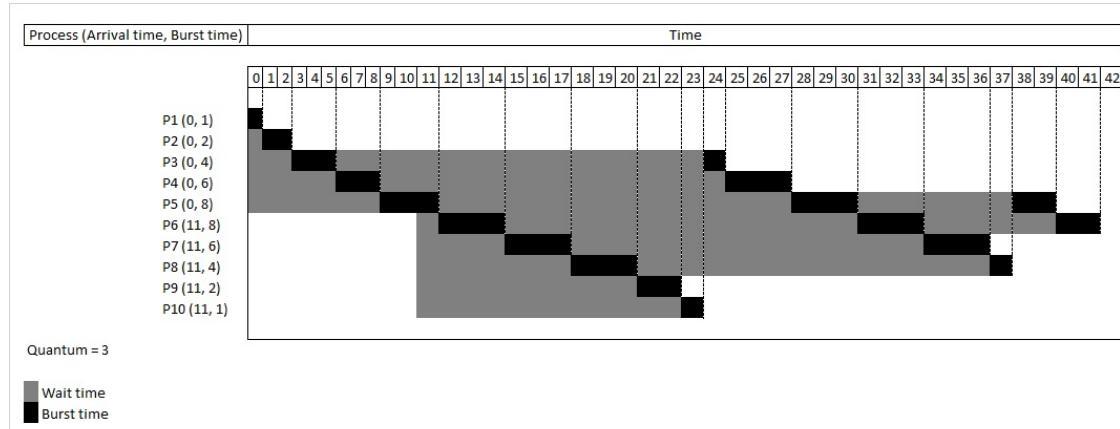


FIGURE 5.1 – Ordonnancement de tâches en round-robin

Cet algorithme d'ordonnancement vise à simuler un système multitraitements, sur une architecture monocœur. Les tâches sont ordonnancées sous forme de liste FIFO, et exécutées successivement pendant un durée maximale égale. Cette durée est exprimée en un multiple entier d'un quanta de temps (aussi appelé *tick*). La définition de celui-ci est déterminante de l'efficacité du système. Round-robin (informatique) – Wikipedia. (s.d). Consulté le 29 juillet 2023 sur [https://fr.wikipedia.org/wiki/Round-robin_\(informatique\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Round-robin_(informatique))

`setup()`, exécutée une seule fois au début du programme, et d'une boucle d'exécution `loop()`, appelée en continu et constituant la base du programme. A cette architecture, ont été ajoutées des interruptions périodiques permettant de répondre aux contraintes de temps réel des satellites.

L'architecture du programme étant maintenant fixée, nous allons pouvoir nous intéresser de plus près aux différentes tâches constituant le programme. Elles sont au nombre de cinq : le démarrage, l'enregistrement et la transmission des données, la lecture des capteurs, la lecture/écriture des entrées/sorties, et la mise à jour du temps UTC.

Le démarrage est réalisé par la fonction `setup()` d'Arduino. Elle permet de configurer le Teensy pour communiquer avec les périphériques du système. Les interruptions représentant les tâches liées aux capteurs, entrées/sorties et module GNSS, y sont configurées.

L'enregistrement et la transmission des données sont gérés par la boucle d'exécution, faisant office d'état de repos (*idle*) du système. La lecture des capteurs ne s'effectuant pas dans cette boucle, des *buffers* ont été utilisés pour stocker temporairement les données à enregistrer. La fonction `loop()` se contente alors de lire les données des *buffers*, de gérer le fichier d'enregistrement, et d'y enregistrer les données. Cet état de repos est interrompu par les tâches d'acquisition des périphériques, et entrées/sorties. Dans leur ordre de priorité, des interruptions ont donc été définies pour la lecture du temps UTC, la lecture/écriture des entrées/sorties, et la lecture des capteurs.

Le module GNSS fournit au Teensy des trames NMEA contenant l'heure UTC et la position du système, en continu, à une fréquence choisie. Afin de correctement analyser ces trames, la bibliothèque utilisée nécessite une fréquence de lecture du port série associé au module GNSS élevée (1kHz). L'interruption chargée de la lecture du port série a donc été définie comme prioritaire.

Le rafraîchissement des sorties et la lecture des entrées ont volontairement été disociés de la boucle d'exécution afin de minimiser sa durée. De plus, l'interruption de lecture des capteurs a un temps d'exécution non négligeable, dû au délai de réponse des capteurs. Il peut arriver qu'à fréquence d'acquisition trop élevée, les appels à la lecture des capteurs s'accumulent. Le Teensy est alors trop occupé à résoudre ces appels et n'exécute jamais la fonction `loop()`. Le remède a été de définir une interruption prioritaire sur l'état de repos et la lecture des capteurs, permettant ainsi à l'utilisateur d'interagir avec le satellite malgré ce blocage.

La lecture des capteurs a également été définie comme interruption périodique, afin de respecter précisément la fréquence d'acquisition. Sa durée d'exécution est conséquente, car elle dépend du temps de réponse des capteurs. Les données acquises sont temporairement stockées dans des *buffers*, servant la file d'attente pour enregistrement des données.

Les Figures 5.2 et 5.3 schématisent le déroulement du programme, et le chronogramme Figure 5.4 illustre les priorités et la pile d'exécution des tâches.

Concernant les sorties, une IHM rustique, mais fonctionnelle, a été implémentée à partir d'une LED. Elle permet le monitoring du fonctionnement du satellite. Celle-ci consiste en une LED restant allumée pendant le démarrage, et clignotant à différentes fréquences pendant le fonctionnement. Au démarrage, si une condition nécessaire au fonctionnement n'est pas satisfaite, cette LED reste indéfiniment allumée. Pendant le fonctionnement, un clignotement lent signifie que le satellite enregistre des données ; un clignotement intermédiaire, que l'enregistrement est désactivé ; et un clignotement rapide, qu'un problème est apparu. A noter que certains problèmes, comme la déconnexion d'un capteur, ne sont détectés que si l'appareil enregistre. Une sortie textuelle de débogage est également disponible sur le port série USB, et permet d'identifier les problèmes survenus. En entrée, seul un bouton permet d'activer/désactiver l'enregistrement. Ces états (LED et enregistrement) sont gérés par l'interruption de lecture/écriture des entrées/sorties.

La configuration des satellites passe, pour le moment, par la modification du code source. Pour faciliter son utilisation, et minimiser les changements à effectuer, le programme a été conçu pour être modulaire. La configuration du système (fréquence d'acquisition, segmentation des données, etc.) s'effectue en tête du fichier, et le choix des capteurs, par l'inclusion des modules développés pour ceux-ci. La Figure 5.5 illustre l'organisation du fichier source.

Des améliorations sont à prévoir comme l'endormissement du microcontrôleur, la modularisation des autres périphériques, ou le rassemblement des *buffers* en une seule classe. Des efforts seront également menés pour affranchir l'utilisateur de la modification du code source. Nous avons donc pensé à un fichier de configuration sur la carte SD, qui sera lu à chaque démarrage du système, plutôt que de devoir téléverser un nouveau programme à chaque modification. L'objectif final est d'éliminer toute différence logicielle entre les satellites, et d'obtenir un kit flexible, capable d'héberger n'importe lequel d'entre eux, voire y connecter un jeu de sondes personnalisé. La réception d'ordres de la passerelle doit également encore être implémentée pour permettre le contrôle du système à distance.

5.1.3 Développement

Le développement du programme s'est déroulé de manière itérative, en suivant le cycle : prise en main du matériel, rédaction de tests unitaires, intégration du matériel, validation du prototype de Cyclopée.

La première phase a consisté en la prise en main du Teensy 3.5, d'un altimètre ultrasonore, ainsi qu'une sonde de température. J'ai donc commencé à interfaçer le Teensy avec la sonde de température, l'altimètre, et une carte SD, avant de rédiger les tests unitaires permettant de vérifier le fonctionnement de ces périphériques une fois connectés. J'ai ensuite commencé à développer un *logger* fonctionnant avec l'horloge interne du Teensy, la *timestamp* du microcontrôleur servant à horodater les données. Le module GNSS a été réservé pour une version plus avancée du prototype. En revanche, ce programme peut très bien convenir à un utilisateur n'ayant pas besoin du temps et positionnement GNSS. Il a d'ailleurs pour avantage de permettre une bien meilleure autonomie qu'un satellite complet. Les deux dernières phases se sont déroulées de la même manière. Tout d'abord la prise en main du module GNSS et de la bibliothèque `TinyGPSPlus`, ainsi que du module Bluetooth. Puis, la rédaction des tests unitaires pour vérifier leur fonctionnement. Et finalement, leur intégration au satellite.

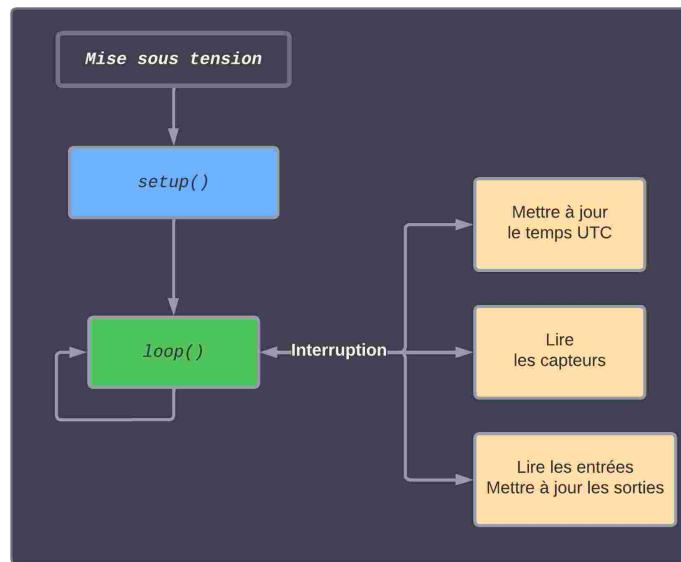


FIGURE 5.2 – Schéma d'exécution du programme

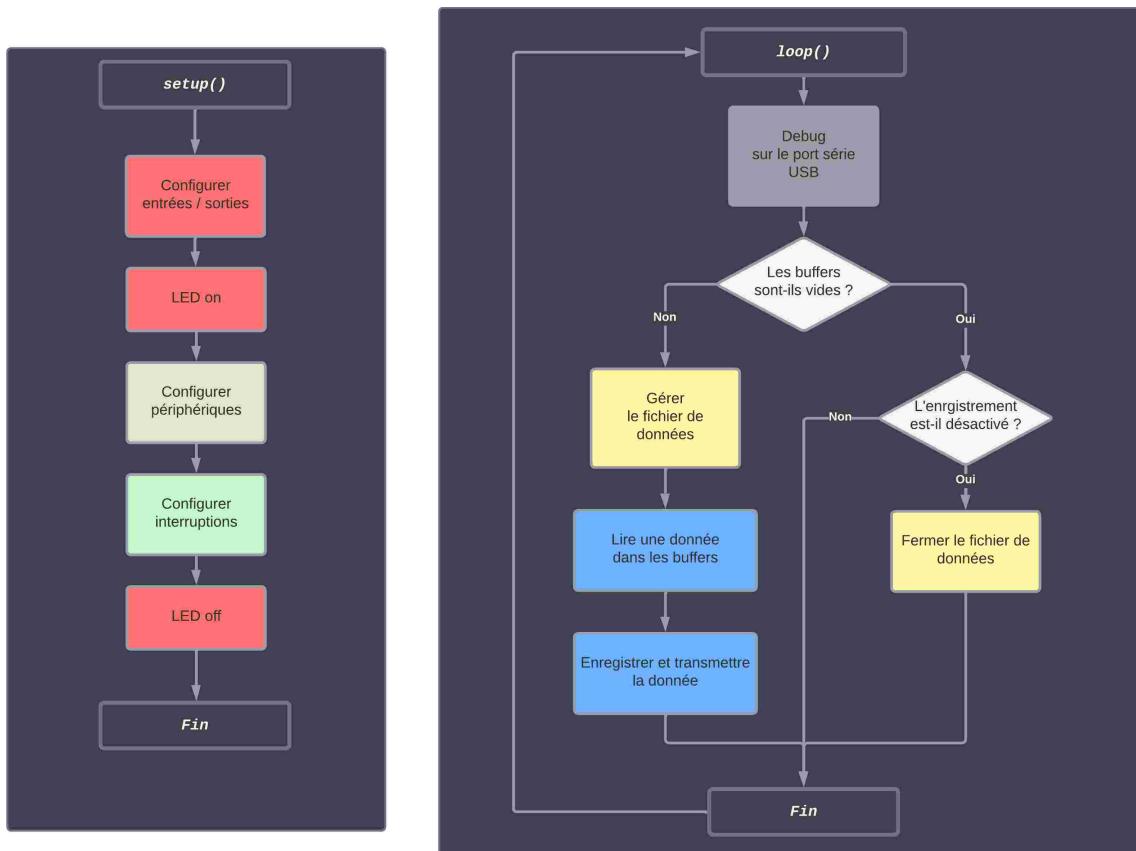


FIGURE 5.3 – Détail des fonctions `setup()` et `loop()`

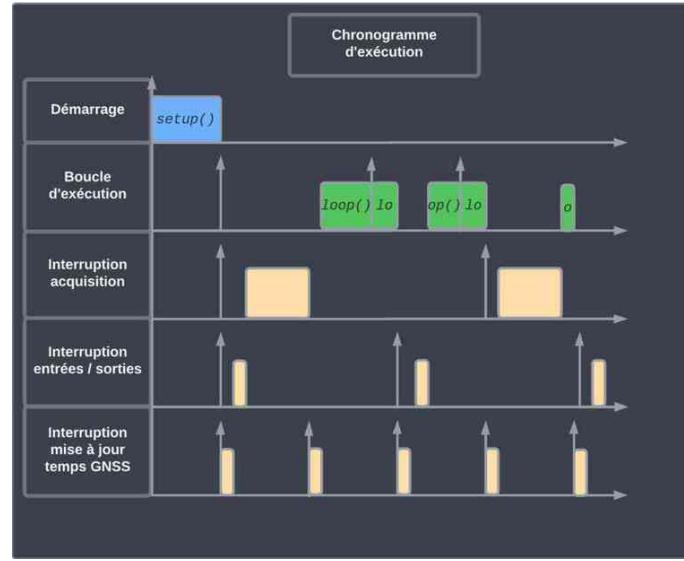


FIGURE 5.4 – Chronogramme d'exécution des tâches

Ce chronogramme présente un exemple d'exécution du programme pour des durées de tâches représentatives de la réalité. Les flèches pointant vers le haut représentent l'appel à une tâche et le rectangle de couleur à l'exécution de celle-ci. On constate que les interruptions concernant les entrées/sorties et le temps UTC sont brèves mais très fréquentes. En revanche, la fonction `loop()` et la lecture des capteurs sont plus longues et moins fréquentes. On remarque également que la boucle d'exécution constitue l'état de repos du système car quand aucune tâche n'est appelée, elle est la seule à s'exécuter en continu.

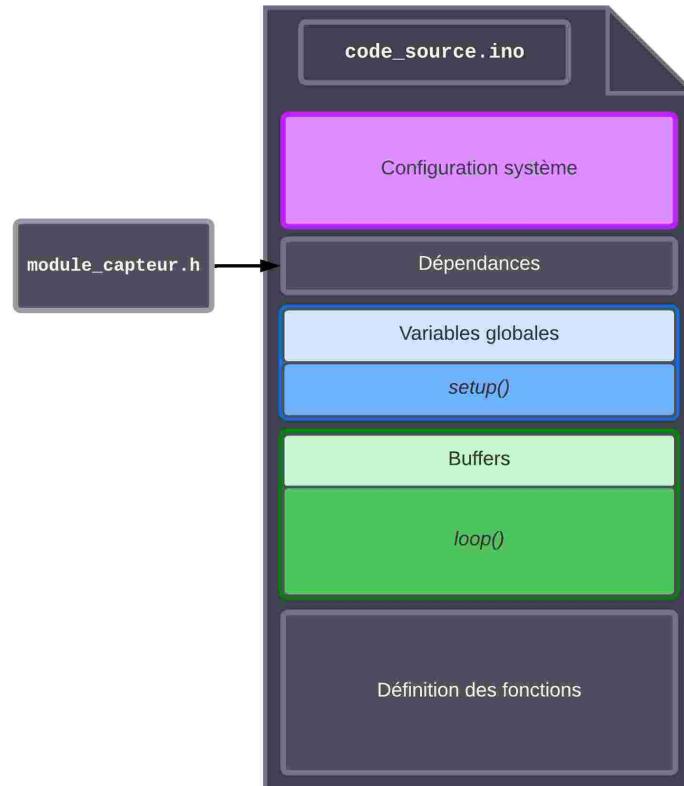


FIGURE 5.5 – Organisation du fichier source

La Figure 5.6 retrace les différentes étapes du développement en montrant l'évolution du prototype au cours de celles-ci.

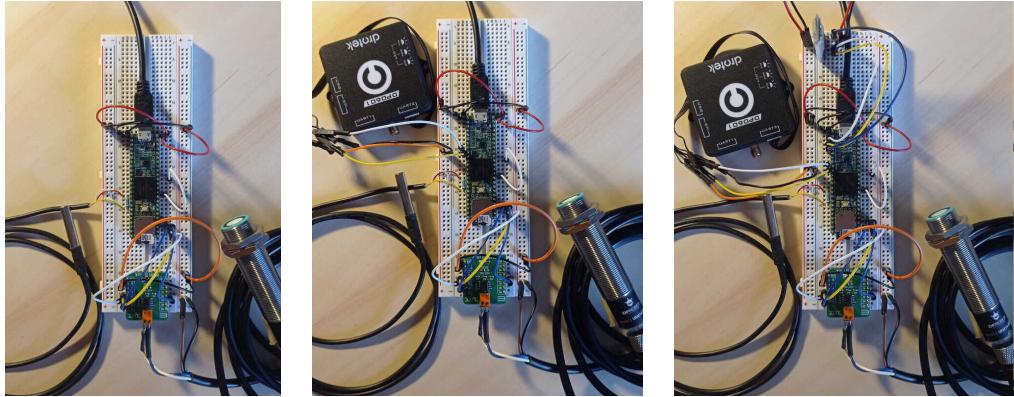


FIGURE 5.6 – Evolution du prototype au cours des phases de développement

A gauche la première phase, avec l'intégration des capteurs et de la carte SD ; au centre la seconde phase, avec l'ajout du module GNSS ; à droite la troisième phase, avec l'arrivée du module Bluetooth.

Le développement des satellites a représenté la majeure partie de ce stage. J'ai néanmoins apporté ma contribution au développement de la passerelle, malgré son architecture globalement déjà existante.

5.2 La passerelle

La passerelle est inspirée du projet OceanIsOpen[13]. Son architecture est quasiment identique, si ce n'est qu'elle n'est pas connectée physiquement au Teensy, mais communique avec lui via la norme Bluetooth. J'ai donc pu travailler, en collaboration avec Julien Ancelin, sur l'établissement de cette liaison. Pour faciliter le déploiement de ce sous-système, et de la malette OceanIsOpen, j'ai également aidé Romain Tourte à automatiser l'installation des briques logicielles nécessaires à son fonctionnement. Julien et Romain se sont ensuite chargés de la conception, du déploiement et de l'insertion en base de données ; de la visualisation des données avec Grafana.

5.2.1 Communication et visualisation des données

Il existe un moyen simple de porter un système communiquant via un port série vers une communication sans fil. Cette solution prend la forme du protocole RFCOMM de la norme Bluetooth. Celui-ci, grâce à son profil *Serial Port Profile* (SPP), permet d'émuler des ports RS-232. Nous nous sommes basés sur ce protocole pour implémenter la communication sans fil entre passerelle et satellites.

Grâce à l'interface Bluetooth du Raspberry Pi, il est possible de connecter à la passerelle jusqu'à sept satellites. À l'aide du logiciel `rfcomm`, implémentation du protocole éponyme, une liaison série a pu être émulée pour chaque satellite connecté, afin de véhiculer les données à la passerelle.

Nous avons ensuite choisi d'utiliser un serveur Node-RED pour facilement programmer la récupération et l'insertion en base de données. La Figure 5.7 présente un programme minimal permettant de lire le port série émulé pour un satellite Cyclopée, et d'afficher le contenu des messages reçus. Ces derniers correspondent à des trames de données (chaînes de caractères) au format JSON, stockées telles qu'elles en base de données. Une trame contient l'identifiant unique du satellite, la date et l'heure, ainsi que les mesures prélevées. Pour gérer les connexions aux satellites, une IHM est en cours de développement sur ce même serveur.

Les données stockées peuvent finalement être visualisées à travers l'interface Grafana réalisée par Julien. Celle-ci présente l'évolution des grandeurs mesurées en fonction du temps, sous forme de graphiques. Une carte permet également de situer le lieu des prises de mesures. L'échelle temporelle est configurable et le tableau de bord personnalisable à souhait. Un aperçu de cette interface est proposé Figure 5.8.

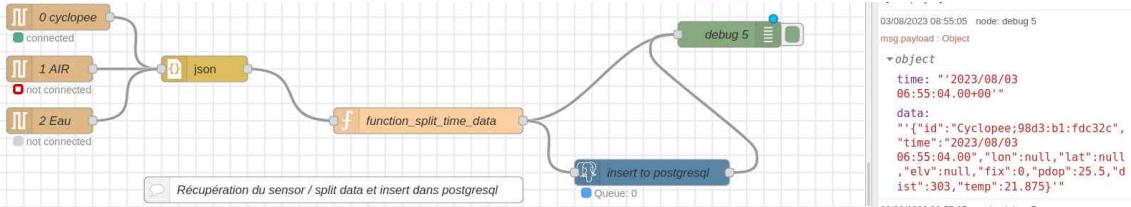


FIGURE 5.7 – Lecture du port émulé dans Node-RED

Ce programme représente le dataflow de la gauche vers la droite. A gauche, les trames JSON sont lues du port série émulé `rfcomm0`, et transformées en objet JavaScript. Au centre, l'objet créé est séparé en une clé primaire, et une chaîne de caractères JSON de données. A droite, ce couple est inséré en base de données et affiché dans la console de débogage.

5.2.2 Automatisation de l'installation

Dans un objectif d'entraide sur nos projets respectifs, Romain et moi avons entrepris la rédaction d'un script `.bash` d'installation. Celui-ci est à exécuter une fois le système d'installé sur le Raspberry Pi. Comme le reste du projet, il a été écrit de façon modulaire, permettant ainsi à l'utilisateur de personnaliser son installation.

Ces deux étapes de première mise en service de la passerelle pourraient être réunies en une seule. En effet, il est possible de créer un image du système d'exploitation, contenant déjà les logiciels nécessaires pour son installation. Ceci constitue une piste d'amélioration et de facilitation de la procédure d'assemblage du système. En revanche, elle ne permet pas la flexibilité qu'a apporté la modularité du script d'installation. Ces deux méthodes sont donc complémentaires et seront toutes les deux proposées à l'utilisateur.

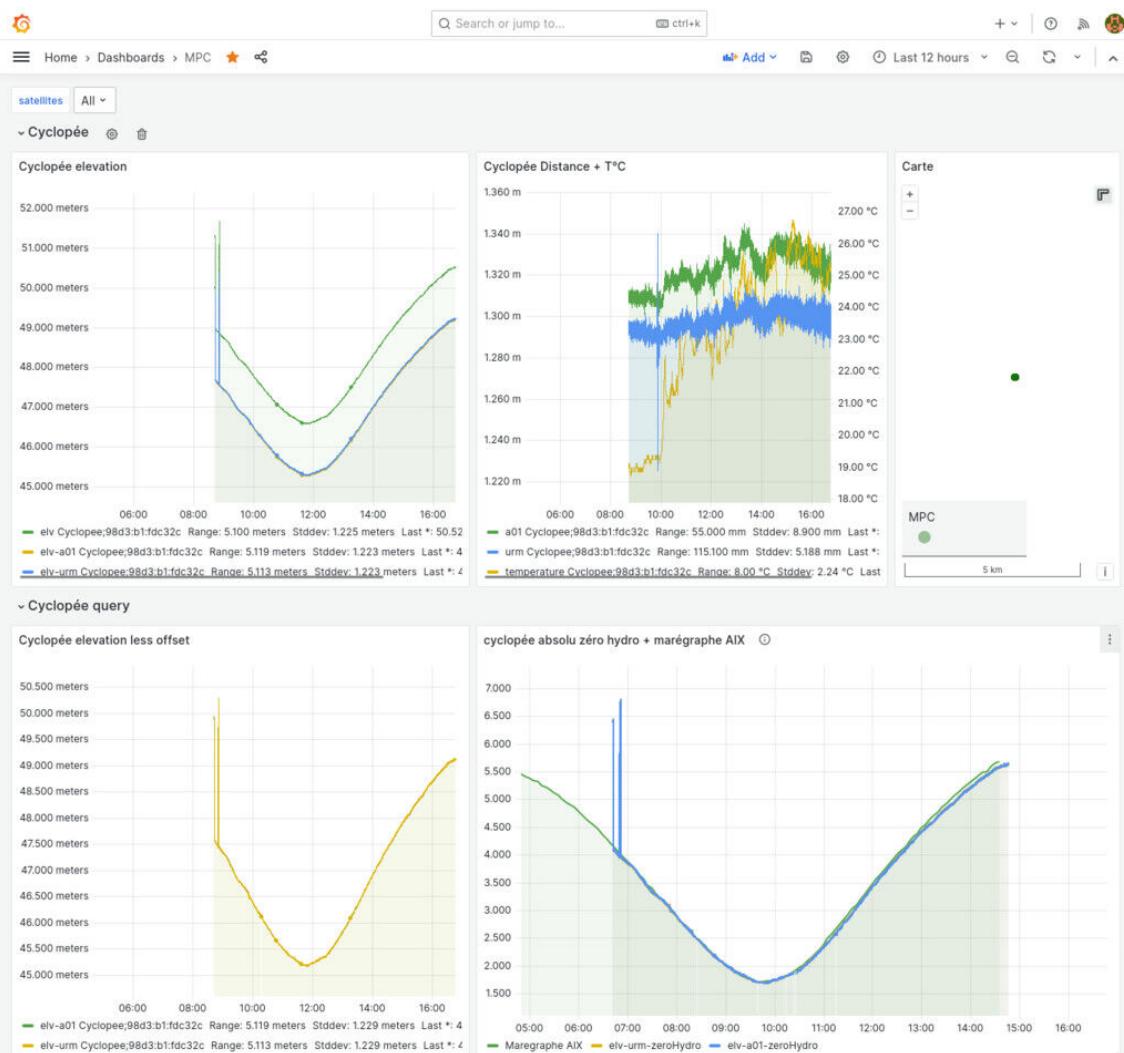


FIGURE 5.8 – Aperçu de l’interface Grafana

Ce tableau de bord Grafana est composé de différents onglets. Dans l’onglet du satellite *Cyclopée*, différents graphiques peuvent être créés pour visualiser les données mesurées, ou réaliser des opérations sur celles-ci. Ici, le graphique *Cyclopée elevation* permet de visualiser l’élévation GNSS de l’antenne ; et le graphique *Cyclopée Distance + T°C*, les séries temporelles des distances mesurées par deux altimètres acoustiques, ainsi que de la température. La *Carte* permet de localiser les points de mesure. En l’occurrence, ils ont tous eu lieu au même endroit, le port des Minimes de La Rochelle.

Dans l’onglet *Cyclopée query* on peut observer sur la gauche, les données post traitées de niveau marin. Le graphique de droite permet de les comparer aux données d’un marégraphe situé à l’île d’Aix.

Chapitre 6

Assemblage du projet

Parmi les deux sous-systèmes du projet, seuls les satellites ont nécessité une conception matérielle et un assemblage. Il a d'abord fallu réaliser la carte électronique supportant tous les composants, avant de confectionner un étui étanche accueillant cette dernière avec sa batterie. Pendant cette phase d'assemblage, nous nous sommes efforcés de réaliser un sous-système flexible, permettant d'héberger tous les satellites définis, et d'anticiper au maximum sur ceux à venir.

Ayant peu d'expérience dans la conception de circuits électroniques, une étape intermédiaire a été réalisée. Elle a pris la forme d'un logger simple, sans Bluetooth ni GNSS, et destiné à l'évaluation des capteurs. Une fois rodé sur l'assemblage de composants électroniques, la carte finale a pu être conçue et réalisée. Enfin, l'adaptation d'une valisette étanche a cloturé la réalisation du support des satellites.

6.1 Le logger d'évaluation capteurs

Pour me former à l'assemblage de composants électroniques et apprendre les rudiments de la conception de circuits, un premier système, plus simple qu'un satellite complet, a été assemblé. Il a été conçu pour héberger le logger fonctionnant avec l'horloge interne du Teensy, mentionné dans la phase de développement logiciel (Section 5.1.3). L'appareil réalisé est utilisé pour enregistrer les données des capteurs pendant leurs tests d'évaluation.

Le projet devant pouvoir être assemblé par ses utilisateurs, le matériel à utiliser doit être facilement trouvable sur internet et faciliter l'assemblage.

Pour la carte électronique, nous avons donc orienté notre choix vers une carte perforée, similaire aux platines de prototypage utilisées pendant le développement logiciel, sur laquelle sont soudés les composants. Les connexions ont été réalisées en priorité par les pistes de la carte perforées, et alternativement par des câbles en cuivre 3A. Des borniers permettent de connecter les capteurs aux différents ports du microcontrôleur. Pour l'alimentation, le module abaisseur de tension permet de convertir une large plage d'entrée en 5V.

Pour constituer l'étui, nous nous sommes servi d'une boîte étanche de récupération. Des presse-étoupes permettent le passage des câbles des capteurs, et des boutons poussoirs d'intéraction avec le système.

Cette étape se rapprochant plus à de l'exploration de possibilités, il n'y a pas vraiment eu de phase de conception. La carte électronique a été assemblée petit à petit, de façon à agencer tous les composants intelligemment, et rentrer dans un étui similaire à une valisette étanche. Un aperçu du prototype réalisé et proposé Figure 6.1.

Tout d'abord, la partie gauche de la carte à trous a été réservée pour rapprocher les borniers du passage des câbles des sondes à travers la paroi gauche de l'étui.

Ensuite, la partie supérieure de la carte à trous a été réservée à l'alimentation. Elle occupe toute sa largeur et permet d'alimenter facilement les composants, peu importe leur position. On trouve donc en haut à gauche un bornier, relié au module abaisseur de tension, et permettant de connec-

ter une source d'alimentation externe à l'étui. En haut à droite, un connecteur deux contacts permet également d'utiliser une batterie, prévue dans la partie droite de l'étui.

Le Teensy 3.5 a été placé loin des parois, afin de permettre l'accès à la carte SD, et au port USB pour le débogage du programme. La majorité des ports série étant concentrés sur un seul côté du microcontrôleur, il a été orienté de façon à faciliter leur connexion aux borniers, et laisser la place aux câbles d'alimentation des capteurs.

Le boîtier étanche a été adapté pour faire passer les câbles des capteurs dans des presse-étoupes à travers la paroi gauche. La carte électronique trouve sa place dans sa partie gauche, et les boutons poussoirs ont été montés sur les parois supérieures et inférieures afin de faciliter leur câblage. Dans la partie droite, le bloc batterie a été fixé avec du velcro.



FIGURE 6.1 – Montage du logger de tests

Pour un premier jet, ce logger remplit bien ses fonctions. Cependant, il a subi plusieurs modifications au cours des développements, car il n'a pas été conçu pour être flexible. De plus, des inconvénients ont été relevés au cours de son utilisation. Ils ont donc été pris en compte pour réaliser la valise multi-satellites.

6.2 La valise multi-satellites

La réalisation du logger de tests a eu une importance capitale dans la conception de la valise multi-satellites. Elle a permis de valider leur principe de fonctionnement, ainsi que d'identifier des problèmes à ne pas reproduire sur ce nouveau prototype. L'agencement de ce premier prototype a néanmoins été globalement conservé. Pour compléter le montage, le module Bluetooth a été intégré, et un port UART isolé a été réservé pour le module GNSS.

Le plus gros problème a été rencontré lors d'une première tentative d'assemblage d'une nouvelle carte électronique, cette fois-ci complète. Par sécurité, les montages étaient testés sur une alimentation limitée en courant. Cependant, un court circuit non-identifié a suffit à rendre une partie des composants inutilisables, lors de la connexion d'une batterie. Le surcourant produit a endommagé l'abaisseur de tension, et sa tension d'entrée s'est retrouvée appliquée à tout le montage. Ces modules d'alimentation étant peu documentés, cet accident nous a permis d'identifier qu'ils constituent une des faiblesses du montage. Acceptant une large plage de tension d'entrée (5-50V), seule une protection en courant a été mise en place en amont du module, afin de le protéger des surcourants, et de maintenir sa tension de sortie. Il s'agit simplement d'un fusible 500mA, adapté à la consommation électrique du prototype.

Nous nous sommes également rendu compte que dessouder les composants endommagés pour les remplacer, n'est vraiment pas pratique. Aussi, tous ne sont pas utilisés, en fonction du satellite programmé sur le Teensy. Nous avons donc décidé d'utiliser des supports à microcontrôleurs

pour tous les composants, permettant de les déconnecter sans difficulté, et optimisant ainsi la maintenance et la consommation de la carte.

Le logger de test s'est parfois révélé peu pratique à l'utilisation. La connexion des sondes était difficile à cause des borniers, qui, soit ne les maintenaient pas, soit endommageaient les broches des capteurs. De plus, les boutons étant soudés à la carte, il n'était pas possible de les sortir complètement du boîtier. Les borniers ont donc été remplacés par des connecteurs Grove, nettement plus faciles à utiliser, et n'endommageant pas les connectiques. Les liaisons avec les boutons ont été rendues amovibles pour permettre le démontage de la carte.

De petites améliorations ont également été réalisées dans une optique d'anticipation des nouvelles sondes que nous pourrions utiliser.

Un bus de données Modbus, permettant le raccordement de deux sondes, a été ajouté. Il pourra servir aux capteurs plus onéreux du marché tels que les sondes de la marque reconnue PON-SEL, vendues par le fabricant Aqualabo, et fonctionnant sur ce protocole.

Des entrées analogiques ont été multiplexées aux ports UART, afin d'accueillir des capteurs analogiques, comme ceux de la valise multicapteurs. La sélection du type d'entrée s'effectue à l'aide d'un cavalier. Ces sondes peuvent nécessiter un montage de résistances pour permettre au microcontrôleur de convertir les signaux. Un espace a donc été prévu près de leur connecteur Grove pour les réaliser.

Cette fois ci, une valisette étanche a été utilisée comme étui. Elle a été adaptée de la même manière que le boîtier du logger de tests. Quelques modifications ont néanmoins été apportées. Le bouton de mise sous tension a été remplacé par un interrupteur à levier trois positions, permettant de sélectionner la source d'alimentation à utiliser. De plus celui-ci a été déplacé sur la face avant de la valisette, caché sous le fermoir gauche, pour ne pas être involontairement changé de position. Cela a entraîné la relocalisation de la partie alimentation en bas de la carte électronique. Le module GNSS est fixé avec du velcro au couvercle de la valisette. Un adaptateur SMA-TNC, monté à travers le couvercle, permet de le relier à son antenne, située à l'extérieur de l'étui.

Les Figures 6.2 et 6.3 présentent les plans et un aperçu de la carte électronique, ainsi que le montage final du prototype de valise multi-satellites. Le projet s'inscrivant dans un objectif de réduction des coûts de mesure, le Tableau 6.1 liste les équipements nécessaires à son assemblage, avec leurs prix chez nos fournisseurs.

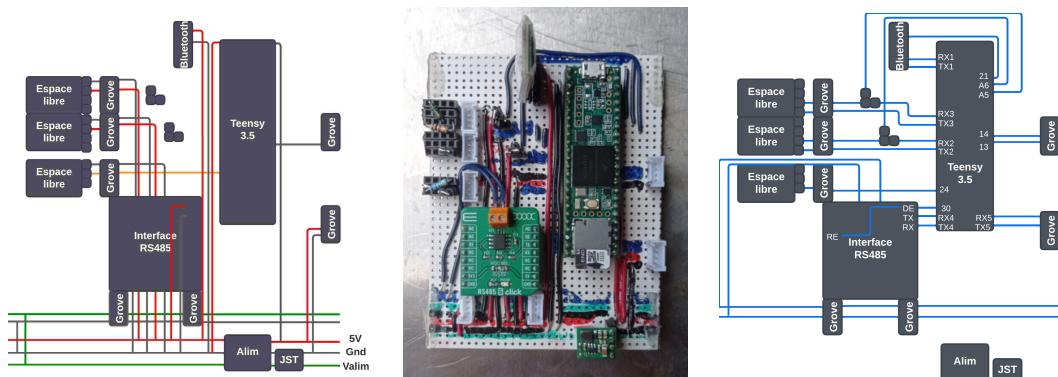


FIGURE 6.2 – Plans et montage de la carte électronique

À gauche, le câblage d'alimentation ; au centre, le montage de la carte électronique ; à droite, le câblage des périphériques



FIGURE 6.3 – Prototype de valise multi-satellites

Composant	Prix HT	Prix TTC	Fournisseur	Référence Fournisseur
Carte électronique				
Teensy 3.5	28,83€	34,60€	Lxtronic	TEENSY35
Platine Step Down 5V	16,00€	19,20€	Lxtronic	POL3792
Carte SD SANDISK 32Go	15,00€	15,00€	Au choix	
MikroE RS485 6 click	14,75€	17,70€	RS	249-4004
Module Bluetooth HC-05	14,08€	16,90€	Lxtronic	OPEN302
Carte matrice, Simple face, pas de 2.54mm, 160x100mm	11,42€	13,70€	RS	100-4340
3 connecteurs femelles 1x40 pour CI	3 x 2,51€	3 x 3,01€	Lxtronic	775470
10 connecteurs Grove	1,25€	1,50€	Lxtronic	110990030
2 connecteurs mâles simple rangée (1x40)	2 x 1,13€	2 x 1,35€	Lxtronic	CC078
Sous total carte électronique	111,12€	130,33€		
Valise marinisée				
Malette de transport Peli 1150 111x232x192mm	79,36€	95,23€	RS	297-4874
2 blocs batterie Li-Ion 3.7V 10.4Ah rechargeables	36,51€	43,81€	RS	144-9409
Bouton-poussoir, Verrouilable lumineux, LED rouge	29,85€	35,82€	RS	811-8506
Connecteur SMA Femelle vers TNC Femelle	10,18€	12,22€	RS	761-9973
Câble d'antenne (SMA/SMA)	5,83€	6,99€	Lxtronic	CSGP02000BK10
5 presse-étoupes M16, Ø3 à Ø7mm, avec contre-écrous, IP68	5,59€	6,71€	RS	669-4667
5 presse-étoupes M20, Ø10 à Ø14mm, avec contre-écrous, IP68	4,88€	5,86€	RS	669-4673
Interrupteur à levier ON-OFF-ON	1,75€	2,10€	Lxtronic	WEN10022
Fusible 5x20mm 500mA à fusion rapide	0,42€	0,50€	Lxtronic	FUS-1
Sous total valise marinisée	174,37€	209,24€		
Total sans périphériques	285,49€	339,57€		
Matériel GNSS (au choix)				
simpleRTK3B Pro (Septentrio)	575,00€	575,00€	ArduSimple	AS-RTK3B-MX5-L125-NH-00
DP0601 RTK GNSS	179,90€	179,90€	Drotek Electronics	0891B08A
DA910 multi-band GNSS Antenna	99,90€	99,90€	Drotek Electronics	0910
Module Grove GPS (Air530)	10,79€	12,95€	Lxtronic	109020022
Adaptateur U.FL-SMA	4,92€	5,90€	Lxtronic	ADA851
Altimètres ultrasonores (au choix)				
URM14	\$99.00	\$99.00	DFRobot	SEN0358
URM08	\$89.00	\$89.00	DFRobot	SEN0246
A01NYUB	\$27.00	\$27.00	DFRobot	SEN0313
JSN SR04T with separate probe	\$16.00	\$16.00	DFRobot	SEN0208
Sondes environnementales				
Gravity : Analog Dissolved Oxygen Sensor / Meter Kit for Arduino	\$169.00	\$169.00	DFRobot	SEN0237-A
Gravity : Analog Electrical Conductivity Sensor / Meter(K=10)	\$79.90	\$79.90	DFRobot	DFR0300-H
Gravity : Analog Industrial pH Sensor / Meter Pro Kit V2	\$64.90	\$64.90	DFRobot	SEN0169-V2
Gravity : Analog Turbidity Sensor	\$9.90	\$9.90	DFRobot	SEN0189

TABLE 6.1 – Liste et prix des composants de la valise multi-satellites

Chapitre 7

Evaluation des capteurs

L'évaluation des capteurs a pour but de déterminer et améliorer les performances des sondes *low cost* que nous avons pu nous procurer, afin de leur donner un contexte d'utilisation. Nous entendons par contexte, les limites, ainsi que les conditions dans lesquelles ils performent le mieux. Ce chapitre présente en premier lieu la méthode statistique imaginée pour évaluer les capteurs. Ensuite les premiers résultats des altimètres, pour le satellite Cyclopée, sont présentés succinctement. Enfin, nous nous intéresserons aux essais de calibration des sondes de qualité d'eau, présentes sur la valise multicapteurs.

7.1 Méthode d'évaluation

Tous les capteurs *low cost* seront évalués suivant la même méthode, à quelques modifications près. L'enjeu principal a été la détermination de leur erreur de justesse et leur incertitude (cf. Annexe C). La première permettra de calibrer les capteurs, afin de les rendre les plus justes possible ; et la seconde renseignera sur la qualité des mesures produites. Enfin, le comportement au soleil des capteurs nécessitant une compensation en température sera étudié.

La documentation très minimalistre de notre fournisseur principal, DFRobot, nous a orienté vers une approche statistique reposant sur de grands jeux de mesures, afin d'obtenir des estimations fiables des paramètres de distribution des mesures.

Un début d'étude a été mené sur les altimètres du satellite Cyclopée, dont les résultats sont présentés en Annexe C.

L'évolution de l'erreur de justesse sur l'entièreté de la plage de mesure des capteurs sera quantifiée en comparant la moyenne de jeux de mesures avec les valeurs à mesurer.

La moyenne des jeux de mesures suivant elle aussi une distribution statistique, nous minimiserons donc sa variabilité. Pour ce faire, le théorème Central Limite atteste que pour un échantillon de n variables aléatoires indépendantes, et suivant une distribution identique mais quelconque, de paramètres (μ, σ^2) , la moyenne de l'échantillon suit une loi normale de paramètres $(\mu, \frac{\sigma^2}{n})$. Pour un jeu de mesures de taille n , en considérant les mesures comme des réalisations de variables aléatoires indépendantes et suivant la même distribution, on constate qu'il suffit d'augmenter le nombre de mesures pour réduire la variabilité de la moyenne. L'écart type de la population pourra être estimé en calculant l'écart type de l'échantillon.

Pour les capteurs nécessitant une compensation de température, comme les altimètres ou les sondes de salinité, l'erreur de justesse sera séparée en deux composantes : une pour l'erreur du capteur même, et l'autre pour l'erreur de compensation. Un test sera alors réalisé pour chaque composante, en faisant varier, pour l'un, la valeur à mesurer, mais à température constante ; et pour l'autre, la température, mais à valeur constante.

La quantification de cette erreur servira à compenser les mesures, et à améliorer les performances des capteurs.

Pour évaluer l'incertitude, de longues périodes d'acquisition pour une même valeur de la grandeur mesurée, seront réalisées pour chaque capteur. Les conditions de test seront relativement proches de celles d'utilisation. Plusieurs paramètres pourront donc varier, dans les intervalles

d'utilisation. Ceci permettra d'obtenir des estimations représentatives de la répartition statistique des mesures dans des conditions réelles.

La normalité des données sera ensuite étudiée, afin de sélectionner la procédure de détermination de l'incertitude. Dans le cas d'une distribution normale, l'écart type σ est un bon estimateur de l'incertitude, pour de grands jeux de mesures. Elle sera alors égale à $\pm 3\sigma$. Dans le cas contraire, nous nous contenterons de calculer des intervalles à partir de proportions des jeux de mesures (100%, 99.9% et 95%), afin de représenter leur répartition.

Finalement, le comportement au soleil des capteurs nécessitant une compensation en température sera étudié, afin de déterminer s'ils doivent être protégés de son rayonnement.

7.2 Evaluation des altimètres

Parmi les quatre altimètres que nous nous sommes procurés chez DFRobot, seuls trois ont été retenus pour évaluation, le quatrième présentant une résolution trop faible pour notre application. Le Tableau 7.1 resume les caractéristiques de ces quatre capteurs.

Leur évaluation a été réalisée sur un banc test (cf. Figure 7.1), fabriqué pour l'occasion.

Capteur	Exactitude annoncée	Résolution	Compensation de température	Etendue de mesure
JSN SR04T		1mm	Externe	20-600cm
A01NYUB	$\pm 1\text{cm}$	1mm	Interne	28-750cm
URM14	$\pm 1\text{mm}$ $\pm 0.1\%$	0.1mm	Interne Externe	10-150cm
URM08	$\pm 1\%$	1cm	Interne	35-550cm

TABLE 7.1 – Synthèse des caractéristiques des altimètres

Jusqu'ici, l'évaluation de l'incertitude des altimètres a permis d'identifier les capteurs les moins sujets aux erreurs aléatoires, à certains niveaux de confiance, décrits en Annexe C. La Figure 7.2, extraite de cette dernière, représente la répartition de leurs mesures, par rapport à leur moyenne.

7.3 Essai de calibration des sondes de turbidité et de salinité

Les sondes de qualité d'eau *low cost* ont été les plus compliquées à trouver sur le marché. Elles représentent les capteurs analogiques de température, de turbidité, de salinité, et d'oxygène dissout de la valise multi-capteurs, que nous avons également pu nous procurer chez DFRobot. Le Tableau 7.2 résume les caractéristiques principales de ces sondes.

Capteur	Mesurande	Exactitude annoncée	Etendue de mesure	Compensation de température
SEN0189	Turbidité			Non
DFR0300-H	Conductivité	$\pm 5\%$	10 à 100mS/cm	Oui
SEN0161-V2	pH	± 0.1 à 25°C	0 à 14	Oui
SEN0237-A	Oxygène dissous		0 à 20mg/L	Oui

TABLE 7.2 – Synthèse des caractéristiques des sondes de qualité d'eau.

Pour le moment, seul un essai de calibration des sondes de salinité et de turbidité a été réalisé, afin de nous assurer qu'elles conviennent à notre utilisation.

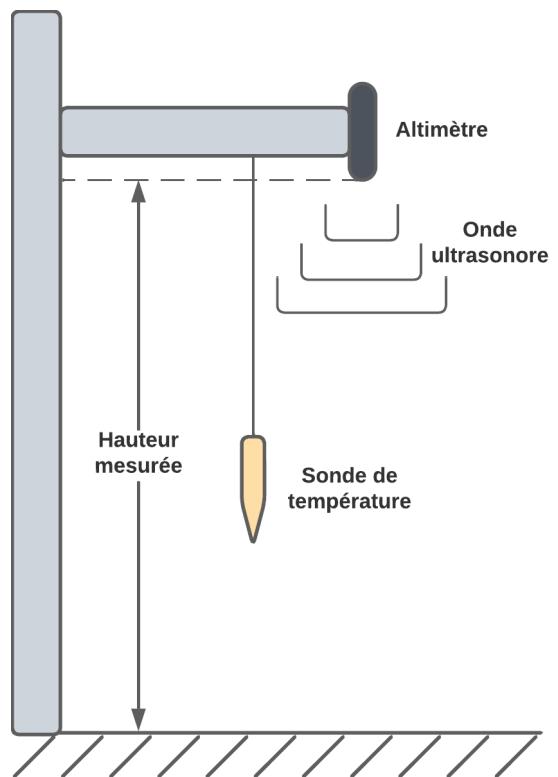


FIGURE 7.1 – Schéma du banc de test des altimètres

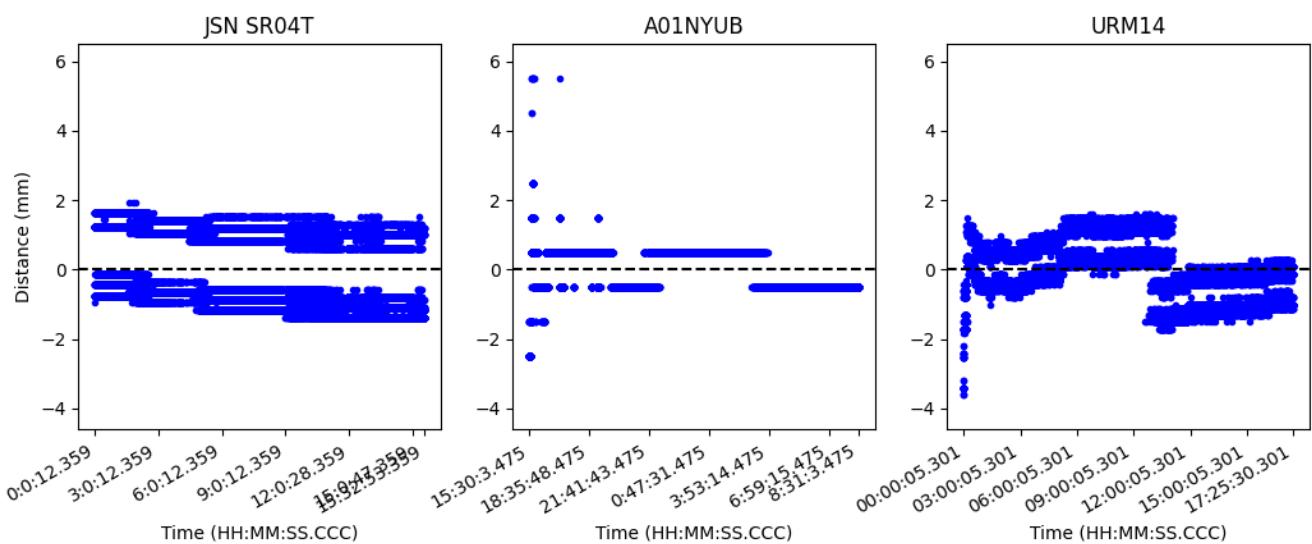


FIGURE 7.2 – Schéma du banc de test des altimètres

L'essai sur la sonde de turbidité a été effectué traçant la courbe liant la turbidité à la tension fournie par la sonde. Quatre jeux de mesures de faible taille ont été réalisés dans quatre solutions étalons plongées dans le noir complet. Une régression linéaire a permis d'approximer les coefficients de la relation entre 200 et 1000NTU. La Figure 7.3 montre l'allure de la courbe de calibration déterminée. Les résultats sont encourageants, mais la courbe de calibration est à améliorer en appliquant la méthode de détermination de l'erreur de justesse.

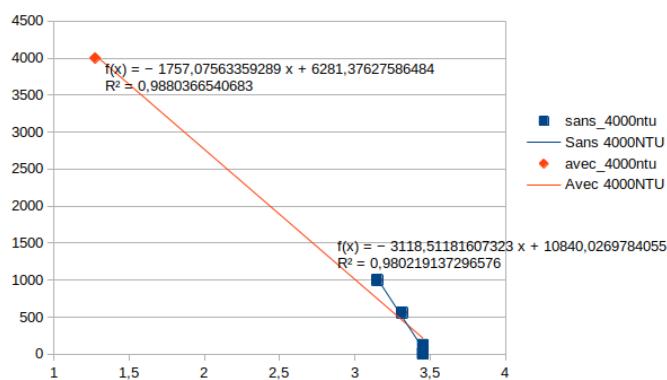


FIGURE 7.3 – Courbe de l'essai de calibration de la sonde de turbidité

En bleu, la courbe de calibration à quatre points, constituant une approximation linéaire de la relation entre tension et turbidité, sur l'intervalle [0 ; 1000]NTU, représentatif des eaux des pertuis; en orange, la courbe de calibration à cinq points, incluant une solution perimée à 4000NTU.

L'essai sur la sonde de salinité a été effectuée avec un seul point, en suivant le protocole automatisé de la bibliothèque développée par le fabricant. Les résultats ont été moins encourageants, car la sonde donne des écarts assez importants sur des valeurs de salinité de l'eau de mer. Cependant, si l'incertitude déterminée pour cette sonde n'est pas trop importante, nous devrions pouvoir réaliser notre propre calibration à partir des valeurs brutes de tension, de la même manière que pour la sonde de turbidité.

Conclusion

Au terme de ce stage, un système de kits de mesure *low cost* fonctionnel, permettant de facilement récolter des données sur le terrain, ainsi que de les mettre à disposition, et de les rendre accessibles, a été réalisé. Celui-ci s'articule autour de satellites, récoltant des mesures, et connectés à une passerelle rassemblant et transmettant ces données.

La phase de conception (Chapitre 3) du projet a permis de dresser un Cahier des Charges Fonctionnel détaillé, disponible en Annexe A. Une gestion de projet (Chapitre 4) centralisée sur Github a permis de suivre et tracer l'avancement du projet, au cours du son développement logiciel (Chapitre 5) et de sa fabrication (Chapitre 6). Au terme de ces deux dernières étapes de développement, deux satellites ont été programmés. Le satellite Cyclopée est chargé de la mesure du niveau marin, tandis que la valise multicapteurs s'occupe de mesurer les caractéristiques de l'eau. Un prototype de valise multisatellites étanche permet d'héberger séparément ces deux satellites, avec leur jeu de sondes. Une passerelle, conçue à partir d'un Raspberry Pi, recueille les données de ces sous-systèmes. Ceci constitue la preuve de concept du projet. À l'heure actuelle, des tests en fonctionnement prolongé sont en cours au port de plaisance des Minimes de La Rochelle.

Une campagne d'évaluation des capteurs *low cost* du marché (Chapitre 7) est également en cours. Elle vise à déterminer leurs limites, améliorer leurs performances, et leur donner un contexte d'utilisation permettant de mieux maîtriser les coûts de mesure.

Ce projet émane des difficultés rencontrées par les chercheurs du laboratoire lors de la prise de mesures. Bien souvent elle nécessite des moyens financiers et logistiques importants, qui constituent un frein à la couverture spatiale et temporelle de larges zones géographiques, telles que les pertuis Rochelais. Ce stage a donc permis de développer une solution à ces problèmes, qui ne concernent probablement pas que les chercheurs du LIENSs, mais ceux de tous les laboratoires.

D'un point de vue personnel, j'ai pu me familiariser avec le développement logiciel collaboratif. J'ai notamment appris à utiliser le logiciel Git et la plateforme Github, qui constituent de précieux atouts à mon panel de compétences. N'étant pas familier avec la programmation embaqrquée, j'ai découvert ses rudiments, même si le matériel *low cost* destiné au grand public s'est avéré quelque peu limitant. Ce stage a également été une excellente opportunité pour entrer dans le monde de la recherche. Je compte y rester en tant qu'ingénieur support, en attendant de me spécialiser dans un domaine de recherche.

Le système réalisé n'est pas encore terminé et nécessite encore des améliorations, pour certaines déjà prévues. Si nous parvenons à décrocher les financements nécessaires, nous pourrons continuer à l'améliorer, en réduisant sa consommation énergétique, en optimisant le code source, et en le rendant plus simple à utiliser. Nous envisageons également de concevoir des circuits imprimés, afin de faciliter l'assemblage, la robustesse et la fiabilité du système.

Une fois éprouvé, il pourra être embarqué à bord de navettes à passagers, ou de voiliers de plaisance, afin d'augmenter la résolution spatiale et temporelle en données de zones maritimes fréquentées, telles que les pertuis Rochelais. Ces données pourront par exemple servir à la calibration du satellite altimétrique SWOT les survolant.

Bibliographie

- [1] Abiteboul S. & Peugeot V. (2017). *Terra Data : qu'allons nous faire des données numériques ?*. Le Pommier
- [2] ANCELIN Julien, Stefal, Julien, Simon Moinard, Wilthezin, François, & Romain Bazile. (2022). jancelin/docs-centipedeRTK : v2.4 (v2_4). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6760153>
- [3] ANCELIN Julien. (2021). jancelin/physalia : v0.1 (V0_1). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5764341>
- [4] Chupin C, Ballu V, Testut L, Tranchant Y-T, Calzas M, Poirier E, Coulombier T, Laurain O, Bonnefond P, FOAM Project T. Mapping Sea Surface Height Using New Concepts of Kinematic GNSS Instruments. *Remote Sensing*. 2020 ; 12(16) :2656. <https://doi.org/10.3390/rs12162656>
- [5] Courson C. & Lizé A. SensOcean, dépôt Github, <https://github.com/astrolabe-expeditions/SensOcean>
- [6] Cycle en V – Wikipédia. Consulté le 25 juillet 2023 sur https://fr.wikipedia.org/wiki/Cycle_en_V
- [7] Hector Linyer, Denis Dausse, Thibault Coulombier, Christine Plumejeaud-Perreau, Nicolas Lachaussée, et al.. Conception d'un système modulaire de collecte de données embarqué sur le drone marin PAMELI. Atelier Expérimentation et Instrumentation, Jul 2019, Lille, France. <hal-02314174>
- [8] Les Pertuis Charentais – LIMITRACK. Consulté le 8 juillet 2023 sur <https://limitrack.univ-lr.fr/le-programme/les-sites/>
- [9] Site officiel du LIttoral, ENvironnement et Sociétés (LIENSs) - UMR 7266. Consulté le 14 août 2023 sur <https://lienss.univ-larochelle.fr/LIttoral-ENvironnement-et-Societes-LIENSs-UMR-7266>
- [10] Site officiel du drone PAMELI. Consulté le 14 août 2023 sur <https://pameli.recherche.univ-lr.fr/>
- [11] Stéphanie Prost-Boucle, Hervé Kamgang Nzeufo, Thomas Bardo, Sylvain Moreau, Hélène Guyard, et al.. Low-cost sensors and datalogger open hardware for wastewaters : Setier project. *Techniques Sciences Méthodes* , 2022. <hal-03727672>
- [12] Tempère A. (s. d.). *Rapport de stage sur la sensibilité des marégraphes à altimètres acoustiques aux conditions météorologiques (Version courte)*.
- [13] TOURTE, R. OceanIsOpen, dépôt Github, <https://github.com/TamataOcean/OceanIsOpen>
- [14] Yann-Treden Tranchant. Vers une meilleure exploitation de l'altimétrie côtière : apports combinés de la modélisation hydrodynamique à haute-résolution et des nouvelles techniques de cartographie du niveau marin par GNSS. *Sciences de la Terre*. Université de La Rochelle, 2022. Français. <NNT : 2022LAROS014>. <tel-03942913>

Liste des tableaux

3.1	Synthèse des besoins techniques	15
3.2	Besoins fonctionnels	19
5.1	Synthèse de projets existants.	32
6.1	Liste et prix des composants de la valise multi-satellites	44
7.1	Synthèse des caractéristiques des altimètres	46
7.2	Synthèse des caractéristiques des sondes de qualité d'eau.	46

Table des figures

1.1	Photo du drone marin PAMELi	7
1.2	Organigramme de contexte du stage	8
2.1	Principe de fonctionnement de Cyclopée	11
2.2	Architecture globale	12
2.3	Exemple de cycle en V	13
2.4	Diagramme de Gantt	13
3.1	Diagrammes des interacteurs système	17
3.2	Bloc Diagramme Fonctionnel du système	20
3.3	Diagramme des interacteurs d'un satellite	21
3.4	Bloc Diagramme Fonctionnel des satellites	23
3.5	Diagramme des interacteurs de la passerelle	24
3.6	Bloc Diagramme Fonctionnel de la passerelle	25
3.7	Diagramme des flux du système	27
4.1	Architecture du dépôt Git	29
4.2	Aperçu de la gestion du projet	30
5.1	Ordonnancement de tâches en round-robin	33
5.2	Schéma d'exécution du programme	35
5.3	Détail des fonctions <code>setup()</code> et <code>loop()</code>	35
5.4	Chronogramme d'exécution des tâches	36
5.5	Organisation du fichier source	36
5.6	Evolution du prototype au cours des phases de développement	37
5.7	Lecture du port émulé dans Node-RED	38
5.8	Aperçu de l'interface Grafana	39
6.1	Montage du logger de tests	41
6.2	Plans et montage de la carte électronique	42
6.3	Prototype de valise multi-satellites	43
7.1	Schéma du banc de test des altimètres	47
7.2	Schéma du banc de test des altimètres	47
7.3	Courbe de l'essai de calibration de la sonde de turbidité	48

Glossaire

Liste des termes

- FabLab** Réseau de laboratoires locaux donnant accès aux individus à des outils de fabrication numériques. 16
- Round-robin** Algorithme d'ordonnancement des processus d'un système informatique. Il peut servir à simuler un système multitraitements et utilisant le *multithreading* sur des processeurs mono cœur. 33
- buffer** Mémoire tampon servant au stockage temporaire de données entre deux processus. 33, 34
- burst** En français, salve. Dans le contexte du projet, série de mesures à haute fréquence, sur une courte période. 18
- caster NTRIP** Serveur de diffusion de corrections RTCM3 à tous ses clients. 16, 18
- logger** Anglicisme d'enregistreur de données. 34
- low cost** En français, à bas prix. 1, 4, 7, 10, 45, 46, 49
- multithreading** Exécution de plusieurs processus (*threads*) en parallèle, sur un système monocœur. 33, 53
- open source** Licence garantissant la libre distribution, l'accès au code source, et la création de travaux dérivés, d'un programme ou d'un logiciel. 4, 16, 28
- timestamp** Compteur de temps s'incrémentant au cours du fonctionnement d'un système électronique ou informatique. 34
- Bluetooth** Norme de télécommunication sans fil, souvent utilisée pour l'Internet des Objets. 22, 26, 31, 34, 37, 41
- cavalier** Composant amovible permettant de relier deux broches d'une carte électronique. 42
- Centipède** Réseau de bases GNSS ouvertes. 16, 25, 31
- cycle en V** "Le cycle en V [...] est un modèle d'organisation des activités de développement d'un produit qui se caractérise par un flux d'activité descendant qui détaille le produit jusqu'à sa réalisation, et un flux ascendant, qui assemble le produit en vérifiant sa qualité"[6]. 13
- Git** Logiciel libre de gestion de versions de projets, majoritairement informatiques. 2, 28, 29, 49, 52, 53
- Github** Plateforme en ligne de développement collaboratif, majoritairement informatique, basée sur l'utilisation de Git, et proposant d'autres outils de gestion de projet. 2, 13, 28, 29, 49
- Grafana** Logiciel libre de visualisation de données provenant de bases de données temporales. 32, 37–39, 52

incertitude Intervalle autour de la mesure d'une grandeur physique d'un capteur, comprenant statistiquement la valeur vraie. 45

justesse Capacité d'un capteur à donner une mesure d'une grandeur physique proche de sa valeur vraie, indépendamment des erreurs aléatoires. 45

multitraitemet Utilisation de plusieurs unités centrales de traitement pour exécuter en parallèle les processus d'un système informatique multiprocesseurs. 32, 33, 53

Node-RED Outil de programmation visuelle (*low-code*), basé sur l'utilisation de flux entre des périphériques matériels et des services informatiques. 25, 38, 52

pertuis Les pertuis sont des zones maritimes abritées et délimitées en général par une ou plusieurs îles et un continent [8]. Les pertuis Rochelais sont donc délimités par les îles de Ré et Oléron, et la côte atlantique française. 9, 10, 14

préemptif Capacité d'un système d'exploitation à interrompre l'exécution d'une tâche au profit d'une autre.. 32

RS-232 Interface de communication série utilisée pour connecter différents périphériques à des ordinateurs. 37

science participative Forme de production de connaissances scientifiques auxquelles des acteurs non-scientifiques ou professionnels participent. 1, 9, 10

velcro Synonyme de fermeture autoagrippante, ou de scratch dans le langage familier. 41, 42

Acronymes

BDF *Bloc Diagramme Fonctionnel*

Diagramme représentant les fonctions contraintes et techniques entre les EME et les composants internes d'un système. 17, 20, 21, 25, 52, 54

BIATSS Personnels de Bibliothèques, Ingénieurs, Administratifs, Techniciens, Sociaux et de Santé). 7

CdCF *Cahier des Charges Fonctionnel*

Document rassemblant les spécifications fonctionnelles d'un système. 1, 14, 16, 17, 23–25, 32, 49, 54

CNRS Centre National de la Recherche Scientifique. 6, 7, 55

EME Eléments du Milieu Extérieur. 2, 16, 17, 54

FIFO *First In First Out ou Premier Entré, Premier Sorti.* 33, 54

GNSS *Global Navigation Satellite System*

Le Système Mondial de Navigation par Satellites représente l'ensemble des constellations de satellites (GPS, GLONASS, Beidou, etc.) servant au positionnement sur la Terre. 1, 4, 10, 11, 15, 18, 21, 22, 24, 28, 31–34, 37, 41, 54, 55

HTML *HyperText Markup Language*

Langage de balisage destiné à l'écriture de pages web. 32, 54

IDG Infrastructures de Données Géographiques. 9

IHM Interface Homme Machine. 25, 26, 34, 37

ITA Personnels ingénieurs, techniciens et personnels administratifs du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS). 7

JSON *JavaScript Object Notation*

Format de données textuel dérivé de la notation des objets du langage JavaScript. 37, 38, 55

LED *Light Emitting Diode*

Diode électroluminescente. 34, 55

LIENSs Littoral Environnement et Sociétés. 2, 4, 6, 7, 9, 15, 49, 55

NMEA *Nationale Marine Electronics Association*

Norme de communication entre les équipements marins, définie par l'association américaine éponyme. 33, 55

NTRIP *Networked Transport of Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM) via Internet Protocol*

Transport de trames RTCM via Protocole Internet en Réseau. 16, 18, 25, 53, 55

NTU *Nephelometric Turbidity Units*

Unité de turbidité. 48, 55

PAMELi *Plateforme Autonome Multicapteurs pour l'Exploration du Littoral*

Drone marin appartenant au LIENSs. 7, 55

RTCM *Radio Technical Commission for Maritime Services*

Format de corrections RTK standard (RTCM3).

Désigne également l'association à but non lucratif à l'origine de ce format. 25, 53–55

RTK *Real Time Kinematics ou Cinématique Temps Réel*

Méthode de positionnement de précision centimétrique, reposant sur la connaissance précise de la position de bases GNSS à proximité. 21–23, 26, 55

UART *Universal Asynchronous Receiver Transmitter*

Emetteur/Récepteur asynchrone universel réalisant les liaisons série entre deux appareils. 21, 41, 55

UMR *Unité Mixte de Recherche*

Laboratoire regroupant des chercheurs rattachés au CNRS, aux universités, au ministère de la Culture et aux opérateurs d'archéologie préventive. 6, 55

UTC *Universal Time Coordinated*

Le Temps Universel Coordonné est une échelle de temps adoptée comme temps civil international par la majorité des pays, et utilisé par les instruments de navigation suivant la norme NMEA. 33, 55

Annexes

Annexe A

Cahier des charges fonctionnel

Système de kits de mesure *low cost*

Cahier des Charges Fonctionnel

Quentin LESNIAK – Stagiaire ingénieur – LIENSs

18 août 2023

Table des matières

Introduction	2
Présentation du projet	2
Identification des besoins	3
Cycle de vie	6
Les Eléments du Milieu Extérieur	6
Description fonctionnelle du besoin	7
Le système	7
Les satellites	12
Cyclopée	16
La valise multicapteurs	16
La passerelle	17
Terminologie	24

Introduction

Ce document a été rédigé en utilisant le langage de balisage L^AT_EX, grâce auquel un système de renvois à différents endroits du rapport a été mis en place, afin d'améliorer le confort de lecture sur écran. Ceux-ci sont tous cliquables, mais pour un problème de lisibilité, ils ont été colorés identiquement au texte. Il convient alors de connaître les différents types de renvois afin de les identifier. Ceux-ci comprennent les références vers les figures, tableaux, chapitres et annexes, et il suffit de cliquer sur le chiffre des identifiants pour être redirigé vers l'objet concerné. Un glossaire a également été mis en place, et si jamais un mot ou un acronyme vous est inconnu, il est fort probable qu'en cliquant dessus, vous soyez amené à sa définition dans le glossaire. Ceci étant dit, passons à l'introduction de ce rapport de stage.

L'objectif du Cahier des Charges Fonctionnel est de lister de manière exhaustive, les besoins auquel doit répondre le système final, en les formulant sous forme de fonctions à réaliser.

Présentation du projet

Aujourd'hui, la donnée est au cœur de l'activité de recherche en sciences environnementales. La couverture spatiale et temporelle de vastes étendues permet d'étudier et de mieux comprendre les phénomènes qui y sont à l'œuvre. Ces données peuvent par exemple servir de comparaison avec les prédictions de nouveaux modèles, et permettent ainsi leur validation ou l'identification des leviers majeurs impactant le phénomène étudié. Dans un contexte de réchauffement climatique, elles permettent également de monitorer à différentes échelles temporelles des variables environnementales renseignant sur l'évolution du milieu. Les pertuis Rochelais sont, par exemple, une zone d'étude privilégiée du laboratoire LIENSs. Les chercheurs y étudient les caractéristiques physico-chimiques de l'eau et leur évolution, la dynamique sédimentaire ou le niveau de la mer. Cependant, ils sont assez mal couverts et manquent cruellement de données à exploiter.

L'utilisation de ces données ne se limite pas au monde de la recherche. Avec l'augmentation prévue et avérée de la fréquence des catastrophes naturelles, le monitoring en temps réel des zones à risque est également devenu un enjeu majeur pour la protection des populations. *Exemple de station météo en Corse.*

En cas d'absence de données, ou si la prise de mesures sur le terrain s'avère onéreuse et compliquée, les chercheurs utilisent des jeux de données existants, plus ou moins facilement accessibles sur internet. De mon expérience au laboratoire, de par la mauvaise couverture des pertuis, trouver un jeu de données adéquat et de qualité n'est pas chose aisée. L'accès à des données fiables constitue donc un enjeu de facilitation du travail des chercheurs et de la qualité de leurs travaux.

Couvrir fréquemment de larges zones n'est pas réalisable à l'échelle d'un laboratoire seul. Depuis une dizaine d'années, de nombreuses associations mettent alors en place des projets de science participative pour satisfaire ces besoins en données. Ceux-ci ont un objectif double : récolter massivement et fréquemment des données environnementales, tout en permettant au grand public d'apporter sa contribution. Pour le lienss, inviter les voiliers, les navires à passagers et les bateaux de courses, à

participer à la recherche est une réelle opportunité pour accroître la résolution spatiale et temporelle des données environnementales des pertuis, et diminuer l'impact environnemental des campagnes océanographiques.

Ce projet s'inscrit donc dans un contexte de besoins de couverture des pertuis en données environnementales. Pour subvenir à celui-ci, un projet de système de kits de mesure low cost et de mise à disposition des données a été imaginé.

Identification des besoins

Le contexte introduit précédemment a permis de formuler le besoin primaire, qui donnera par la suite au système ses fonctions primaires, inscrites dans le CdCF. Une approche par projet a également permis de recenser les besoins techniques des chercheurs. Ils serviront à dimensionner le système aux besoins scientifiques des chercheurs.

La principale raison de l'existence de ce projet est le manque de données environnementales dans la zone des pertuis Rochelais. Nous nous sommes interrogés sur les raisons de ce manque, et avons relevé que le coût des campagnes de mesure, et les difficultés rencontrées quant à la mise à disposition des données, constituent des freins à leur acquisition. Le besoin primaire, auquel doit répondre le système, a donc été formulé ainsi :

Récolter, à moindre coût, des séries temporelles de données environnementales sur un vaste territoire, et faciliter leur mise à disposition.

En plus du besoin primaire, un temps d'échange avec les chercheurs a permis d'identifier des besoins ou contraintes techniques auxquels le système doit répondre, afin de mener ses missions à bien au sein de leurs projets de recherche. Les différents projets recensés se concentrent sur deux thématiques : la mesure du niveau marin et la mesure de la qualité de l'eau. Le tableau synthétise les informations recueillies lors de ce temps d'échange. Elles sont précieuses pour l'établissement du Cahier des Charges Fonctionnel.

Projet	Site d'étude	Objectif	Mesurandes prioritaires	Mesurandes secondaires	Fréquence d'acquisition	Autonomie	Remarques
INRAE	Marais 10-50cm d'eau Végétation	Qualité de l'eau Biodiversité Niveau d'eau	GNSS Salinité Température	O ₂ pH Turbidité Chlorophylle	15min	Alimentation externe ?	Monitoring temps réel
SONEL	Plans d'eau (Pertuis?)	Bouée de niveau marin Rélectométrie	GNSS	Température de l'air Préssion atmosphérique	10Hz < 1Hz	1 à 5 jours. Alimentation externe à bord.	Facilité de déploiement Monitoring temps réel. Stockage sur carte SD.
I. BRE-NON	Estuaires (Charente, Afrique)	Dynamique sédimentaire	Température Salinité Turbidité	Position GNSS Vagues	10-15min Mode burst (salve)	10 à 20 jours. Autonome	
RiOMar	Estuaire de la Charente	Etude de l'interface Charente / Mer.	O ₂ pH : ±0,01 Chlorophylle	Température Salinité Turbidité	1Hz	1/2 journée. Alimentation externe ?	Mesure dynamique
SONEL	Mer Océan Estuaire	Cartographie dynamique	Cyclopée	Température Pression atmosphérique ±0,1hPa	<1Hz	1 mois Alimentation externe à bord.	Embarqué à bord de navires
Mathieu	Atlantique	Cartographie transatlantique	Cyclopée Température Salinité Turbidité		GNSS : 1Hz Sinon ≈30min	Le plus autonome possible.	Embarqué sur un voilier à travers l'Atlantique.
Aquarium Marais	8 bassins de pisciculture	Monitoring Pilotage	O ₂ Température Salinité Turbidité	pH	1h	Alimentation externe Déploiement permanent	Monitoring temps réel. Alarmes

	Toit du LIENSs	Quantifier la dérive sur de longues périodes	Cyclopée		Alimentation externe. Déploiement pendant 10 ans.		
Bouée pertuis			Cyclopée Météo	Température Salinité Turbidité	1Hz	Autonome	Transfert de données à distance

Table 1 – Synthèse des besoins techniques

Cycle de vie

Pour les systèmes destinés à la production, le cycle de vie du produit comporte de nombreuses phases. Dans notre cas, nous nous sommes limités aux cinq suivantes, permettant d'appréhender l'évolution du système dans le temps. Pour améliorer la lisibilité de CdCF, elles ont été identifiées par une lettre.

L'assemblage (A) prend en compte l'installation logicielle, le montage de système, la protection contre les erreurs de montage, et le contrôle du bon fonctionnement du système fraîchement assemblé. L'utilisation (U) consiste en l'installation sur le terrain, la mise en/hors service, la période de fonctionnement du système. La maintenance (M) comprend les réparations que nécessite le système après usure. Le stockage (S) correspond aux périodes pendant lesquelles le système n'est plus utilisé, mais doit rester fonctionnel en vue d'une utilisation future. La fin de vie (F) débute lorsque le système entre en stockage définitif, et ne sera plus utilisé en tant que tel.

Phases du cycle de vie :

Assemblage (A)
Utilisation (U)
Maintenance (M)
Non utilisation / Stockage (S)
Fin de vie (F)

Les Eléments du Milieu Extérieur

Les EME identifiés durant les phases du cycle de vie sont les suivants :

L'utilisateur.	Le serveur.
Les grandeurs physiques à mesurer.	L'énergie apportée au système.
Le signal GNSS.	Le lieu d'utilisation.
Le <i>caster</i> NTRIP Centipède.	L'environnement marin.
Les mesures / données générées.	

Description fonctionnelle du besoin

Le système

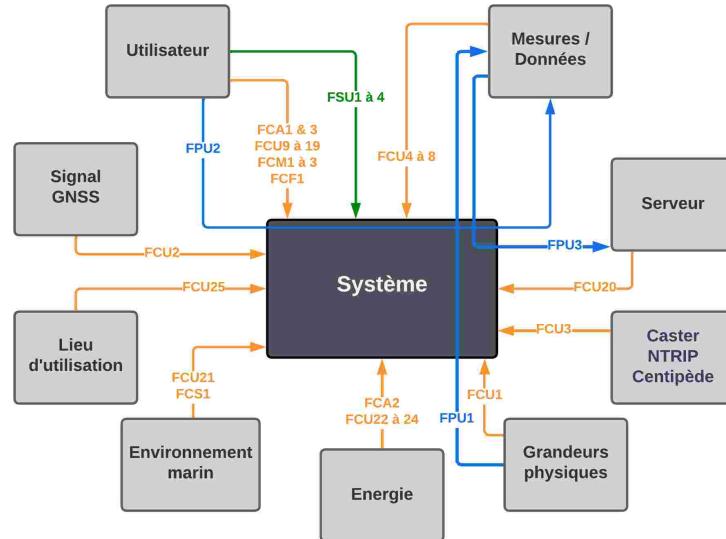


Figure 1 – Diagramme des interacteurs du système

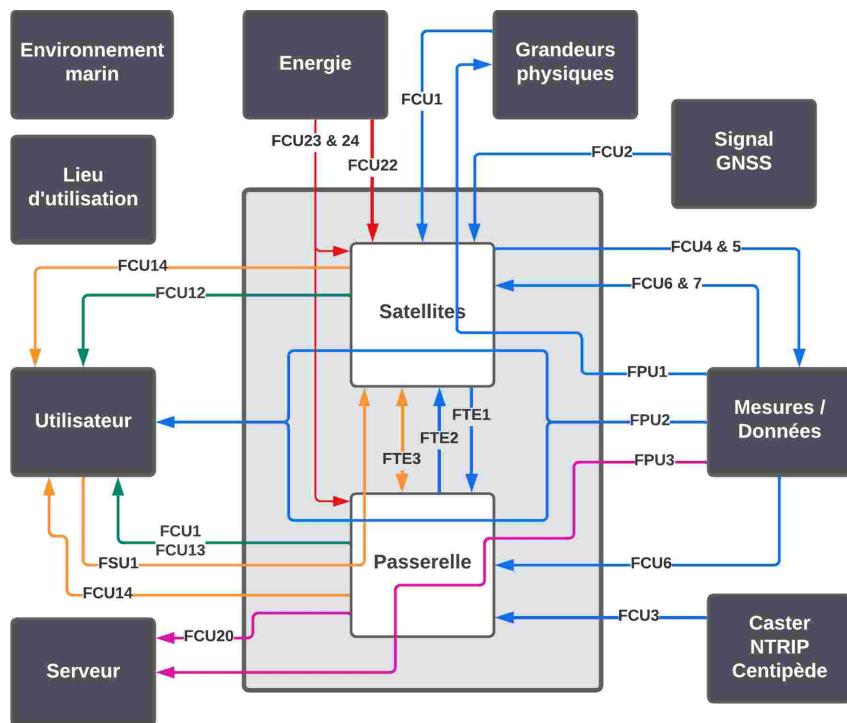


Figure 2 – BDF du système

En bleu, la chaîne d'acquisition ; en orange, la chaîne de commande ; en vert, la chaîne de visualisation ; en rouge, la chaîne d'énergie ; en violet, la chaîne de synchronisation.

N°	Fonction	Critères	Niveaux
Fonctions Principales			
Phase d'utilisation (U)			
FP _{U1}	Générer des données environnementales en mesurant des grandeurs physiques.		
FP _{U2}	Rendre les données accessibles aux utilisateurs		
FP _{U3}	Mettre à disposition les données automatiquement.		
Fonctions Secondaires			
Phase d'utilisation (U)			
FS _{U1}	Permettre à l'utilisateur de commander le système à distance.		
FS _{U2}	Alerter l'utilisateur.		
FS _{U3}	Avoir différents modes de mesure.	Mesure ponctuelle Mode <i>burst</i>	
FS _{U4}	Être pratique.		
Fonctions Contraintes			
Phase d'assemblage (A)			
FC _{A1}	Être facilement assemblable par l'utilisateur.		
FC _{A2}	Être protégé en tension et courant.		
FC _{A3}	Permettre le contrôle du bon fonctionnement par l'utilisateur.		
Phase d'utilisation (U)			
FC _{U1}	Mesurer des grandeurs physiques.		
FC _{U2}	Pouvoir recevoir le signal GNSS.		
FC _{U3}	Être connecté au Centipède.	Connexion Internet Client NTRIP	
FC _{U4}	Géoréférencer les mesures.	Précision du positionnement	A définir par satellite...
FC _{U5}	Horodater les mesures.	Fréquence d'acquisition GNSS	A définir par satellite...
FC _{U6}	Stocker les données.		

FC_U_7	Stocker une copie des données.			
FC_U_8	Segmenter les données.			
FC_U_9	Pouvoir stopper l'enregistrement des données.			
FC_U_{10}	Avoir une période de segmentation réglable.			
FC_U_{11}	Avoir une fréquence d'acquisition réglable.	Plage de fréquences	De 1h à 5Hz. A définir par satellite...	
FC_U_{12}	Permettre l'accès aux données.			
FC_U_{13}	Permettre la visualisation des données.	Monitoring temps réel Fenêtre de temps modifiable		
FC_U_{14}	Informier l'utilisateur de l'état du système.			
FC_U_{15}	Être abordable.			
FC_U_{16}	Être facile à installer.			
FC_U_{17}	Être facile à mettre en service.			
FC_U_{18}	Être facile à transporter.			
FC_U_{19}	Être sans danger.			
FC_U_{20}	Copier la base de données sur le serveur.	Connexion Internet		
FC_U_{21}	Résister à l'environnement marin.	Indice de protection	IP67 minimum A définir par satellite...	
FC_U_{22}	Avoir une bonne autonomie.	Durée d'autonomie Panneaux solaires		A définir par satellite...
FC_U_{23}	Pouvoir être alimenté extérieurement.			
FC_U_{24}	Être mis sous/hors tension.			
FC_U_{25}	S'adapter aux lieux d'utilisation.	Facilité d'utilisation en bateau.		
Phase maintenance (M)				
FC_{M1}	Nécessiter peu de maintenance.			
FC_{M2}	Être facilement réparable.	Facilité à changer les composants.		
FC_{M3}	Être facilement mis à jour.			
Phase de stockage (S)				

FC_{S1}	Résister à l'environnement marin.	Indice de protection pendant le stockage	IP67 minimum
Fin de vie (F)			
FC_{F1}	Être démontable pour le tri.		

Table 2 – Besoins fonctionnels

Les satellites

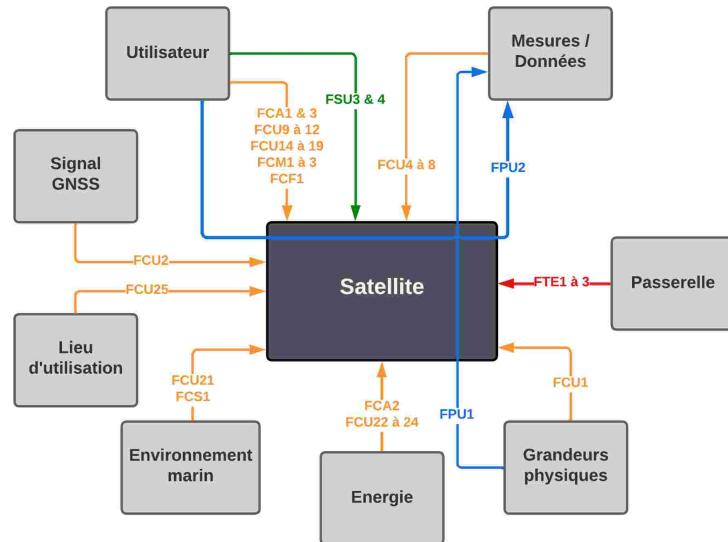


Figure 3 – Diagramme des interacteurs des satellites

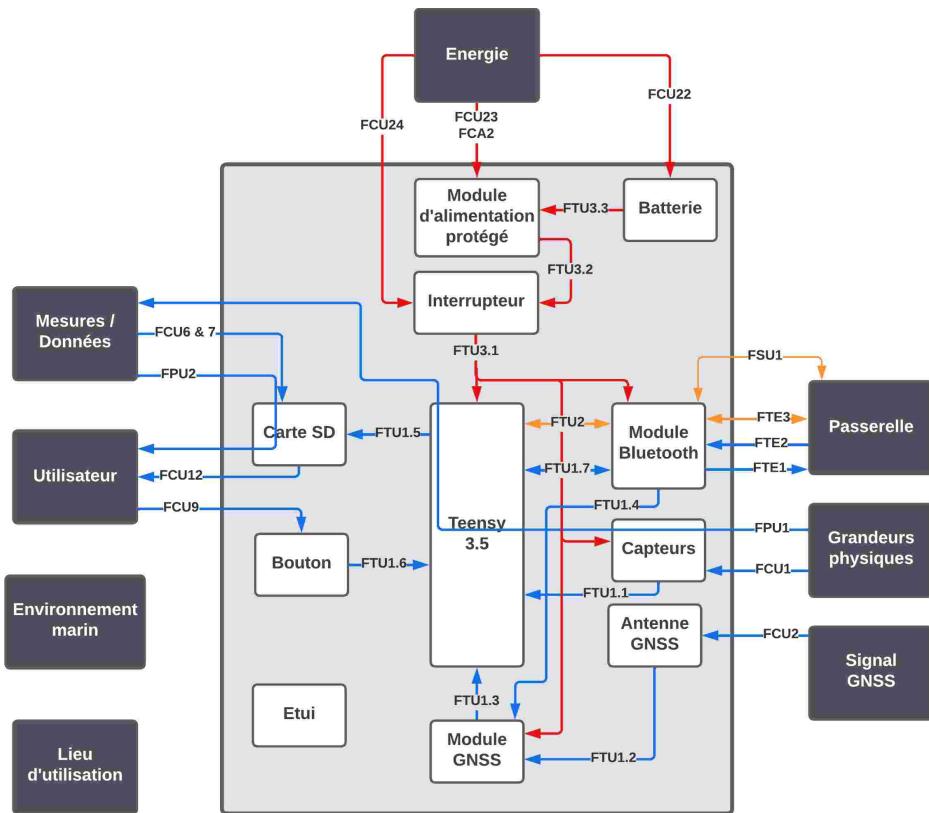


Figure 4 – BDF des satellites

En bleu, la chaîne d'acquisition ; en orange, la chaîne de commande ; en rouge, la chaîne d'énergie.

N°	Fonction	Critères	Niveaux
Fonctions Principales			
Phase d'utilisation (U)			
FP _{U1}	Générer des données environnementales en mesurant des grandeurs physiques.		
FP _{U2}	Donner accès aux données à l'utilisateur		
Fonctions Secondaires			
Phase d'utilisation (U)			
FS _{U3}	Avoir différents modes de mesure.	Mesure ponctuelle Mode <i>burst</i>	
FS _{U4}	Être pratique.		
Fonctions Contraintes			
Phase d'assemblage (A)			
FC _{A1}	Être facilement assemblable par l'utilisateur.		
FC _{A2}	Être protégé en tension et courant.		
FC _{A3}	Permettre le contrôle du bon fonctionnement par l'utilisateur.		
Phase d'utilisation (U)			
FC _{U1}	Mesurer des grandeurs physiques.		
FC _{U2}	Pouvoir recevoir le signal GNSS.		
FC _{U5}	Horodater les mesures.	Fréquence d'acquisition GNSS	A définir par satellite...
FC _{U6}	Stocker les données.		
FC _{U7}	Stocker une copie des données.		
FC _{U8}	Segmenter les données.		
FC _{U9}	Avoir une période de segmentation réglable.		
FC _{U10}	Avoir une fréquence d'acquisition réglable.	Plage de fréquences	De 1h à 5Hz. A définir par satellite...
FC _{U11}	Permettre l'accès aux données.		

FC _{U12}	Permettre la visualisation des données.	Monitoring temps réel Fenêtre de temps modifiable		
FC _{U13}	Informier l'utilisateur de l'état du système.			
FC _{U14}	Être abordale.			
FC _{U15}	Être facile à installer.			
FC _{U16}	Être facile à mettre en service.			
FC _{U17}	Être facile à transporter.			
FC _{U18}	Être sans danger.			
FC _{U20}	Résister à l'environnement marin.	Indice de protection	IP67 minimum A définir par satellite...	
FC _{U21}	Avoir une bonne autonomie.	Durée d'autonomie	A définir par satellite...	
FC _{U22}	Pouvoir être alimenté extérieurement.			
FC _{U23}	Être mis sous/hors tension.			
FC _{U24}	S'adapter aux lieux d'utilisation.	Facilité d'utilisation en bateau.		
Phase maintenance (M)				
FC _{M1}	Nécessiter peu de maintenance.			
FC _{M2}	Être facilement réparable.	Facilité à changer les composants.		
FC _{M3}	Être facilement mis à jour.			
Phase de stockage (S)				
FC _{S1}	Résister à l'environnement marin.	Indice de protection pendant le stockage	IP67 minimum	
Fin de vie (F)				
FC _{F1}	Être démontable pour le tri.			

Table 3 – Besoins fonctionnels des satellites

N°	Fonction	Critères	Niveaux
Fonctions Techniques Externes (E)			
FT _{E1}	Envoyer les données sans fil à la passerelle.	Vitesse de communication Portée	... 10m
FT _{E2}	Recevoir les corrections RTK de la passerelle.		
FT _{E3}	Exécuter les ordres de la passerelle.		

Table 4 – Fonctions techniques externes des satellites

N°	Fonction	Critères	Niveaux
Fonctions Techniques			
Phase d'utilisation (U)			
FT _{U1.1}	Lire les mesures de capteurs.		
FT _{U1.2}	Transmettre le signal GNSS au module GNSS.		
FT _{U1.3}	Acquérir la position et le temps GNSS.		
FT _{U1.4}	Transférer les corrections RTK au module GNSS.		
FT _{U1.5}	Ecrire les données sur la carte SD.		
FT _{U1.6}	Interrompre l'enregistrement des données.		
FT _{U1.7}	Envoyer les données au module Bluetooth.		
FT _{U2}	Recevoir / Envoyer les ordres / réponses au module Bluetooth.		
FT _{U3.1}	Alimenter et protéger tous les composants.		
FT _{U3.2}	Mettre sous/hors tension.		
FT _{U3.3}	Relier la batterie au module d'alimentation.		

Table 5 – Fonctions techniques des satellites

Cyclopée

N°	Fonction	Critères	Niveaux
Fonctions Contraintes			
Phase d'utilisation (U)			
FC _{U4}	Géoréférencer les mesures.	Précision du positionnement	1cm voire 1mm
FC _{U5}	Horodater les mesures.	Fréquence d'acquisition GNSS	5Hz
FC _{U10}	Avoir une fréquence d'acquisition réglable.	plage de fréquences	15min à 5Hz.
FC _{U20}	Résister à l'environnement marin.	Indice de protection	IP67 minimum
FC _{U21}	Avoir une bonne autonomie.	Durée d'autonomie Panneaux solaires	Le plus autonome possible. Idéalement 5 jours à fréquence d'acquisition élevée.

Table 6 – Niveaux de satisfaction du satellite Cyclopée

La valise multicapteurs

N°	Fonction	Critères	Niveaux
Fonctions Contraintes			
Phase d'utilisation (U)			
FC _{U4}	Géoréférencer les mesures.	Précision du positionnement	< 10m
FC _{U5}	Horodater les mesures.	Fréquence d'acquisition GNSS	1Hz
FC _{U10}	Avoir une fréquence d'acquisition réglable.	plage de fréquences	1h à 1Hz.
FC _{U20}	Résister à l'environnement marin.	Indice de protection	Sondes IP68 minimum IP67 minimum
FC _{U21}	Avoir une bonne autonomie.	Durée d'autonomie Panneaux solaires	Le plus autonome possible

Table 7 – Niveaux de satisfaction de la valise multi-capteurs

La passerelle

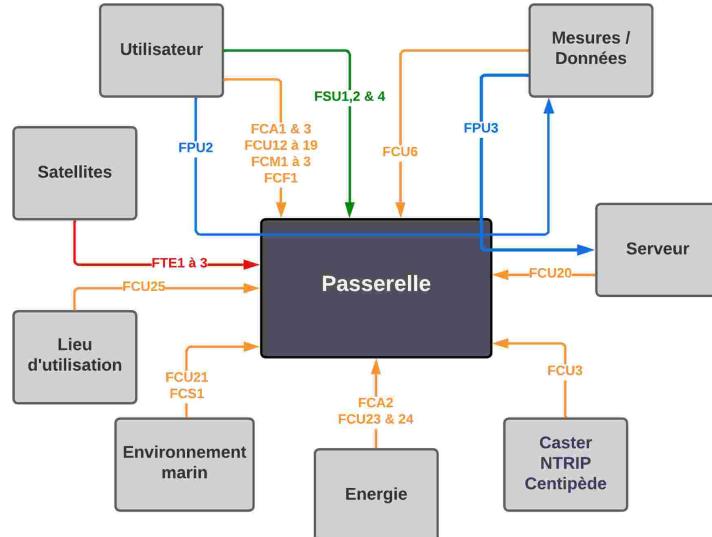


Figure 5 – Diagramme des interacteurs du système

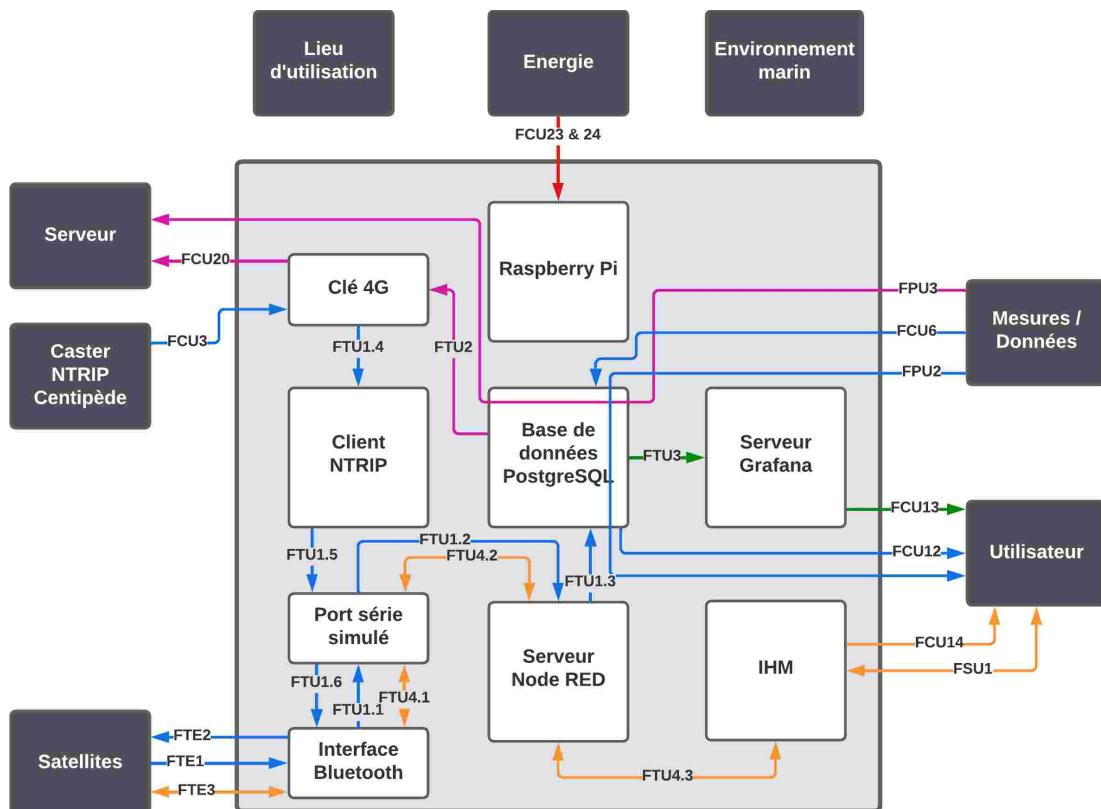


Figure 6 – BDF de la passerelle

En bleu, la chaîne d'acquisition ; en orange, la chaîne de commande ; en vert, la chaîne de visualisation ; en rouge, la chaîne d'énergie ; en violet, la chaîne de synchronisation.

N°	Fonction	Critères	Niveaux
Fonctions Principales			
Phase d'utilisation (U)			
FP _{U2}	Donner accès aux données à l'utilisateur		
FP _{U3}	Mettre à disposition les données automatiquement.		
Fonctions Secondaires			
Phase d'utilisation (U)			
FS _{U1}	Permettre à l'utilisateur de commander le système à distance.		
FS _{U2}	Alerter l'utilisateur.		
FS _{U4}	Être pratique.		
Fonctions Contraintes			
Phase d'assemblage (A)			
FC _{A1}	Être facilement assemblable par l'utilisateur.		
FC _{A2}	Être protégé en tension et courant.		
FC _{A3}	Permettre le contrôle du bon fonctionnement par l'utilisateur.		
Phase d'utilisation (U)			
FC _{U3}	Être connecté au Centipède.	Connexion Internet Client NTRIP	
FC _{U6}	Stocker les données.		
FC _{U11}	Permettre l'accès aux données.		
FC _{U12}	Permettre la visualisation des données.	Monitoring temps réel Fenêtre de temps modifiable	
FC _{U13}	Informier l'utilisateur de l'état du système.		
FC _{U14}	Être abordale.		
FC _{U15}	Être facile à installer.		
FC _{U16}	Être facile à mettre en service.		
FC _{U17}	Être facile à transporter.		
FC _{U18}	Être sans danger.		

FC_{U19}	Copier la base de données sur le serveur.	Connexion Internet		
FC_{U20}	Résister à l'environnement marin.	Indice de protection	IP67 minimum A définir par satellite...	
FC_{U22}	Pouvoir être alimenté extérieurement.			
FC_{U23}	Être mis sous/hors tension.			
FC_{U24}	S'adapter aux lieux d'utilisation.	Facilité d'utilisation en bateau.		
Phase maintenance (M)				
FC_{M1}	Nécessiter peu de maintenance.			
FC_{M2}	Être facilement réparable.	Facilité à changer les composants.		
FC_{M3}	Être facilement mis à jour.			
Phase de stockage (S)				
FC_{S1}	Résister à l'environnement marin.	Indice de protection pendant le stockage	IP67 minimum	
Fin de vie (F)				
FC_{F1}	Être démontable pour le tri.			

Table 8 – Besoins fonctionnels de la passerelle

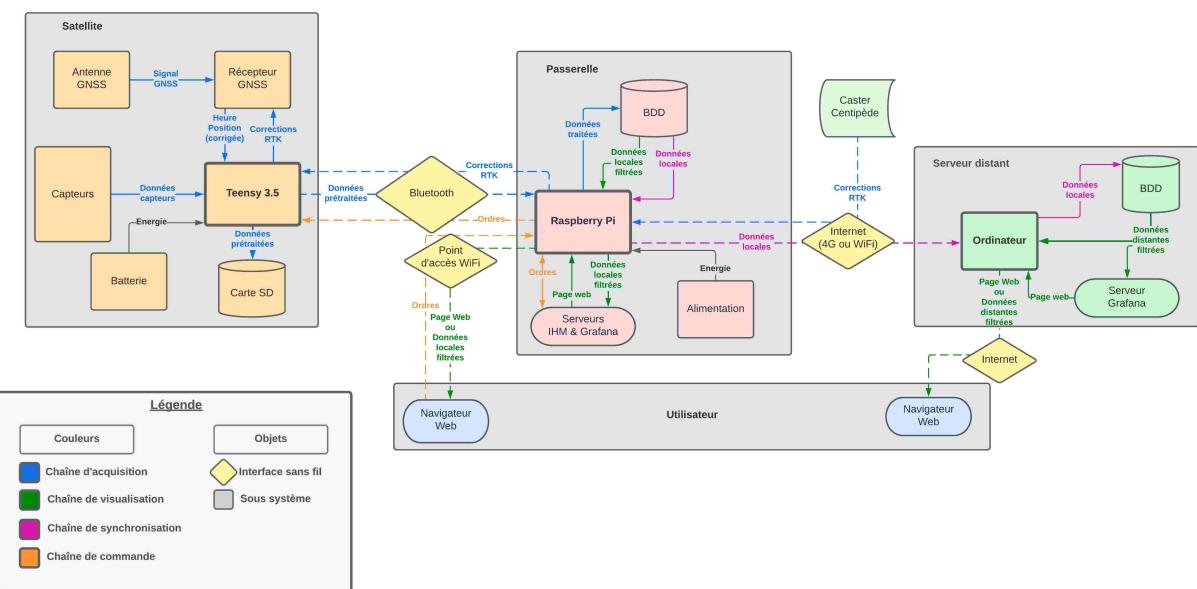
N°	Fonction	Critères	Niveaux
Fonctions Techniques Externes (E)			
FT _{E1}	Recevoir les données sans fil des satellites.	Vitesse de communication Portée	... 10m
FT _{E2}	Envoyer les corrections Real Time Kinematics ou Cinématique Temps Réel (RTK) aux satellites.		
FT _{E3}	Transmettre les ordres aux satellites.		

Table 9 – Fonctions techniques externes de la passerelle

N°	Fonction	Critères	Niveaux
Fonctions Techniques			
Phase d'utilisation (U)			
FT _{U1.1}	Transférer les données Bluetooth au port simulé.		
FT _{U1.2}	Lire les données sur le port série simulé.		
FT _{U1.3}	Ecrire les données en base de données.		
FT _{U1.4}	Transférer les corrections RTK au port série simulé.		
FT _{U1.5}	Transférer les corrections RTK à l'interface Bluetooth.		
FT _{U2}	Envoyer le copie de la base de données sur Internet.		
FT _{U3}	Lire et afficher les données à l'utilisateur.		
FT _{U4.1}	Envoyer / Recevoir les ordres / réponses à l'interface Bluetooth.		
FT _{U4.2}	Envoyer / Recevoir les ordres / réponses au port série simulé.		
FT _{U4.3}	Envoyer / Recevoir les ordres / réponses à l'IHM.		

Table 10 – Fonctions techniques de la passerelle

Diagramme des flux global du système



Terminologie

Liste des termes

burst En français, salve. Dans le contexte du projet, série de mesures à haute fréquence, sur une courte période. 9, 13

caster NTRIP Serveur de diffusion de corrections 3 à tous ses clients. 6, 9, 19

low cost En français, à bas prix. 1

Bluetooth Norme de télécommunication sans fil, souvent utilisée pour l'Internet des Objets. 15, 22

Centipède Réseau de bases GNSS ouvertes. 6

RTCM Format de corrections RTK standard (RTCM3).

Désigne également l'association à but non lucratif à l'origine de ce format. 25

Acronymes

BDF *Bloc Diagramme Fonctionnel*

Diagramme représentant les fonctions contraintes et techniques entre les EME et les composants interne d'un système. 7, 12, 17, 25

CdCF *Cahier des Charges Fonctionnel*

Document rassemblant les spécifications fonctionnelles d'un système. 1–3, 6, 25

EME Eléments du Milieu Extérieur. 1, 6, 25

GNSS *Global Navigation Satellite System*

Le Système Mondial de Naviguation par Satellites représente l'ensemble des constellations de satellites (GPS, GLONASS, Beidou, etc.) servant au positionnement sur la Terre. 4, 6, 9, 13, 15, 16, 25

IHM Interface Homme Machine. 22

LIENSs Littoral Environnement et Sociétés. 1, 2, 5

NTRIP *Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*

Transport de trames RTCM via Protocole Internet en Réseau. 6, 9, 19, 25

RTK *Real Time Kinematics ou Cinématique Temps Réel*

Méthode de positionnement de précision centimétrique, reposant sur la connaissance précise de la position de bases GNSS à proximité. 15, 21, 22, 25

Annexe B

Synthèse des projets

Système de kits de mesure *low cost*

Synthèse de projets existants

Quentin LESNIAK – Stagiaire ingénieur – LIENSs

17 août 2023

Table des matières

SensOcean	2
Fonctionnement	2
Liste grossière du matériel	2
Architecture logicielle	2
Détail des sondes	2
SETIER Datalogger	4
Fonctionnement	4
Liste grossière du matériel	4
Architecture logicielle	4
Détail des sondes	4
OceanIsOpen	6
Fonctionnement	6
Liste grossière du matériel	6
Architecture logicielle	6
Détail des sondes	7
Synthèse des fonctionnalités	8

SensOcean

<https://github.com/astrolabe-expeditions/SensOcean>

Fonctionnement

SensOcean est un boîtier autonome de mesure de température et salinité de l'eau de mer ainsi que de la température et pression ambiante. Il fonctionne par cycles de mesures dont la période de déclenchement peut être configurée. Le reste du temps, le boîtier est en veille. Après chaque cycle de mesures, les données sont affichées sur un écran et enregistrées sur une carte SD. Il fonctionne sur batterie et se recharge seul grâce à un panneau solaire.

Liste grossière du matériel

- ESP32 ;
- Ecran ePaper (bien de jour, pas terrible de nuit) ;
- Horloge temps réel (pour la date et l'heure) ;
- Sondes avec ou sans circuit de conditionnement ;
- Batterie + panneau solaire ;
- Slot SD (stockage de la configuration et des données) ;
- Recepteur GPS (uniquement pour la position).

Architecture logicielle

La station majoritairement en veille, elle se réveille pour effectuer les mesures. Utilisation du mode *deepsleep* de l'ESP32, qui permet d'uniquement utiliser la fonction `setup()` d'Arduino. La configuration du boîtier (intervalles de mesures, etc.) est à renseigner dans le fichier de configuration sur la carte SD.

L'interface utilisateur se compose d'une signalisation LED et de l'écran. Ce dernier affiche l'étape en cours pendant le *boot* et les mesures après un cycle.

La calibration requiert le téléchargement de programmes d'aide à la calibration vers l'ESP32, un moniteur série pour récupérer les valeurs des sondes et des tableaux Excel pour le calcul de la conductivité des solutions étalons. Le système prévient également l'utilisateur si les sondes doivent être recalibrées.

Détail des sondes

Ce projet est équipé de 4 capteurs :

- Un capteur de température DS18B20 ;
- Un capteur de pression BMP280 ;
- Un kit Atlas Scientific K 0.1 Conductivity ;
- Un kit Gravity Analog Temperature.

Seuls les kits suivants nous intéressent, car leurs sondes résistent à l'eau salée :

Kit Atlas Scientific K 0.1 Conductivity	Graphite
Etendue de mesure	0.07 à 50 000 µS/cm
Précision	+/-2%
Temps de réponse	90% en 1s
Température d'utilisation	1 à 110°C
Durée de vie estimée	10 ans
Longueur de câble	1m
Prix	219.99€
Kit Gravity Analog Temperature	Sonde Température PT-1000
Type de sonde	Platine Classe B, RTD
Etendue de mesure	-50 à 200°C
Précision	+/- (0,3 + 0,005.T)
Temps de réponse	90% en 8s
Durée de vie estimée	15 ans
Longueur de câble	1m
Prix	29.99€

SETIER Datalogger

https://gitlab.irstea.fr/reversaal/setier_datalogger

Fonctionnement

Son fonctionnement est proche de celui de *SensOcean*. Le datalogger effectue des cycles de mesures à une fréquence configurable (choix limités). Il présente par contre une plus grande variété de sondes. Il permet également de déclencher et visualiser des mesures sur une page HTML, de télécharger les données mesurées et de rentrer les coefficients de calibration via son point d'accès WiFi. Il est alimenté sur secteur.

Liste grossière du matériel

- Arduino MKR WiFi ;
- Shield de connecteur pour capteurs ;
- Shield SD ;
- Sondes avec ou sans circuits de conditionnement ;
- Boîtes à relais I²C pour le pilotage de l'alimentation des capteurs ;
- Hub I²C pour le contrôle des relais ;
- Horloge temps réel (pour la date et l'heure) ;
- Alimentation secteur.

Architecture logicielle

Le datalogger est majoritairement en veille. Il se réveille pour effectuer un cycle de mesure capteur par capteur, c.à.d. que tous les capteurs sont mis sous tension, acquièrent une donnée et mis hors tension les uns après les autres. La période de mesure est configurable parmi les choix proposés.

L'interface utilisateur est une page HTML accessible sur le réseau WiFi du datalogger. Elle permet de lancer une mesure pour un capteur en particulier, visualiser la valeur mesurée, télécharger les données acquises et stockées sur la carte SD, entrer les coefficients de calibration.

Le processus de calibration est identique au projet *SensOcean* mais il n'y a pas besoin de téléverser de nouveau programme à l'ESP32 et les valeurs des sondes sont retournées sur la page HTML, non pas sur un port série.

Détail des sondes

Les capteurs utilisés pour ce projets ont été approuvés pour la mesure d'eaux usées par les chercheurs ayant développé le datalogger. **Ils ne semblent néanmoins pas tous totalement étanches.**

Fournisseurs :

Farnell

DFRobot

SEN0169	pH
Tension d'entrée	3.3 à 5.5V
Etendue de mesure	0 à 14
Température d'utilsation	0 à 60°C
Résolution	0.1
Temps de réponse	<1min
Durée de vie estimée	6 mois
Longueur de câble	5m
Prix	US\$65
DFR0300	Conductivité
Tension d'entrée	3 à 5V
Etendue de mesure	0 à 20µS/cm
Température d'utilsation	0 à 40°C
Durée de vie estimée	6 mois
Longueur de câble	1m
Prix	65€
SEN0464	Potentiel Redox
Tension d'entrée	5V
Etendue de mesure	-2000 à 2000mV
Température d'utilsation	5 à 70°C
Précision à 25°C	10mV
Prix	US\$129
SEN0237	Oxigène Dissous
Tension d'entrée	3.3 à 5.5V
Etendue de mesure	0 à 20mg/L
Température d'utilsation	0 à 60°C
Durée de vie estimée	12 mois
Durée de vie de la membrane	1-2 mois
Durée de vie de la soude	1 mois
Longueur de câble	2m
Prix	155€

OceanIsOpen

https://gitlab.irstea.fr/reversaal/setier_datalogger

Fonctionnement

Le projet OceanIsOpen est le plus complet des trois. En plus d'une station de mesure, il compte aussi un système de stockage et mise à disposition des données sophistiqué.

La station de mesure effectue des acquisitions périodiques, de fréquence paramétrable, pour stockage temporaire local sans jamais entrer en veille.

Le système de stockage peut être séparé en deux parties, le stockage local (sur la station) et distant (sur un serveur distant). Sur la station, les acquisitions sont envoyées dans une base de données PostgreSQL qui les stocke avec leurs métadonnées (date, heure et position GNSS). Ces données sont accessibles via le point d'accès WiFi embarqué de la station. L'application web et un serveur Grafana permettent de gérer et visualiser les données en local.

Les données locales sont envoyées pour stockage vers un serveur PostgreSQL distant grâce à un accès à internet fourni par une carte SIM. De ce serveur accessible depuis internet, elles peuvent être extraites et utilisées.

Liste grossière du matériel

- Raspberry Pi ;
- Teensy (ESP32) ;
- Sondes avec ou sans circuits de conditionnement ;
- Module GPS ;
- Serveur distant.

Architecture logicielle

Le Teensy effectue les acquisitions périodiquement (si les logs sont activés) et les envoie aux Raspberry à travers un port série au format JSON. Il scrute également les ordres envoyés par le Raspberry Pi sur ce port.

Le Raspberry joue plusieurs rôles dans le système. Il héberge :

- Un serveur multiusages ;
- Une application web (interface utilisateur) ;
- Une base de données PostgreSQL ;
- Un serveur Grafana ;
- Un service d'injection auto.replay des données au serveur distant.

Le serveur multiusages (`serveur.js`) est chargé : d'intégrer avec la base de données (insertions, extractions, etc.), de gérer la communication avec le Teensy (données entrantes et ordres sortants), de récupérer l'heure et la position GNSS, et la communication avec l'application web `ReactApp` (page web sortante et ordres Teensy entrants). L'application web et le serveur Grafana proposent une interface utilisateur permettant de respectivement contrôler paramétriser le Teensy et calibrer

les capteurs ; et visualiser les données en base de données.

Le script `auto.replay` permet d'injecter les données sur le serveur distant.

Détail des sondes

Fournisseur : DFRobot

SEN0161	pH
Tension d'entrée	5V
Etendue de mesure	0 à 14
Température d'utilsation	0 à 60°C
Précision (25°C)	±0.1
Temps de réponse	≤1 min
Prix	US\$29.5
DFR0300	Conductivité
Tension d'entrée	3.0 à 5.0V
Etendue de mesure (recommandée)	0 à (15) 20mS/cm
Température d'utilsation	0 à 40°C
Précision	±5% F.S.
Durée de vie	6 mois
Longueur de câble	1m
Prix	US\$69.9
SEN0189	Turbidité
Tension d'entrée	5.0V
Temps de réponse	<500ms
Température d'utilsation	5 à 90°C
Prix	US\$9.9
SEN0244	TDS
Tension d'entrée	3.3 à 5.50V
Etendue de mesure	0 à 1000ppm
Précision (25°C)	±10% F.S
Prix	US\$11.80

SEN0237-A	Oxygène dissous
Tension d'entrée	3.3 à 5.5V
Etendue de mesure	0 à 20mg/L
Temps de réponse (25°C)	98% en 90s
Durée de vie de l'électrode	1 an
Rempalacement membrane	1-2 mois
Longueur de câble	2m
Prix	US\$169
SEN0165	ORP
Tension d'entrée	3.0 à 5.5V
Température d'utilisation	-55 à 125°C
Précision (-10 à 85°C)	±0.5°C
Longueur câble	95cm
Prix	US\$6.90

Synthèse des fonctionnalités

	SensOcean	SETIER Datalogger	OceanIsOpen
Alimentation	Batterie	Secteur	Batterie
Recharge	Secteur Solaire	Batterie	Secteur
Mise en veille	Oui	Oui	Non
Date/Heure	Horloge	Horloge	GNSS
Accès aux données	SD	SD WiFi	Internet WiFi SD
Visualisation de données	Ecran (temps réel) post traitement	Post traitement	Grafana (local ou distant)
Signalisation LED	Oui	Non	Non
Ecran	Oui	Non	Oui
Aide à la calibration	+	++	+++

Annexe C

Evaluation des altimètres

Kits de mesure *low cost*

Comparaison des altimètres

Quentin LESNIAK – Stagiaire ingénieur – LIENSS

1 Objectifs

- Identifier l'altimètre le plus adapté à notre utilisation (le plus fidèle).
- Améliorer sa précision en compensant ses erreurs de justesse et améliorant sa compensation de température.
- Donner un contexte d'utilisation aux autres capteurs (maîtrise des coûts).

2 Matériel et méthode

2.1 Altimètres à tester

Les altimètres à tester sont au nombre de 4. Le Tableau de caractéristiques 1 résume les avantages et inconvénients de chacun des capteurs.

Capteur	Exactitude annoncée	Résolution	Ouverture du faisceau	Compensation en température	Temps de réponse	Indice de protection	Consommation	Etendue de mesure
JSN SR04T	?	1mm	75°	Externe	?	Waterproof	30mA	20-600cm
A01NYUB	±1cm	1mm	40° ou 55°	Interne	100ms	IP67	<15mA	28-750cm
URM14	±1mm ±0.1%	0.1mm	12°±2°	Interne Externe	33ms (30Hz)	IP65	350mA	10-150cm
URM08	±1%	1cm	60°	Interne	70-100ms	IP65	250mA	35-550cm

TABLE 1 – Synthèse des caractéristiques des altimètres

Le JSN SR04T est probablement le capteur le plus prometteur dont nous disposons. Il permet une compensation de température externe, et donc ajustable. Son ouverture de faisceau est très large et devrait permettre de compenser la gîte ou le roulis d'un bateau. En revanche il faudra bien le placer en dehors du bateau pour ne pas perturber les mesures. Enfin, il est classé IP67, soit étanche 30min à 1m, et consomme peu. Même si son exactitude et son temps de réponse restent inconnus, ils devraient pouvoir être estimés dans la suite de ce rapport.

Ce capteur ne convertit pas le temps de parcours de l'onde sonore qu'il émet en distance. La grandeur renvoyée par le capteur est un temps, à partir duquel nous calculons la distance. Ce calcul fait intervenir la vitesse du son dans l'air, dépendant elle-même de la température de l'air. La formule utilisée pour calculer cette vitesse est la suivante :

$$V_T = V_0 + 0.606 \times T$$

Où $V_0 = 331.1\text{m/s}$, qui correspond à la vitesse du son dans de l'air à 0°C.

L'A01NYUB a également beaucoup d'avantages. Son ouverture de faisceau peut être utile pour compenser la gîte ou le roulis du bateau. Sa faible consommation est intéressante et son étanchéité un vrai plus. Son exactitude annoncée, combinée à sa résolution au mm, devraient permettre

de descendre en dessous du cm en moyennant plusieurs mesures. Seul hic, la compensation de température est interne au capteur et ne peut être modifiée. Il faudra alors protéger les capteur du soleil pendant l'utilisation.

L'URM14 a des arguments assez différents. Son exactitude annoncée et sa fréquence d'acquisition sont supérieures à celles de tous les autres capteurs. Il permet également une compensation en température externe. Cependant sa faible étendue de mesure pourrait être un frein à l'utilisation de Cyclopée.

L'URM08 a été mis de côté à cause de sa faible résolution (1cm), bien que son ouverture de faisceau soit intéressante.

Les altimètres retenus pour les tests sont donc le **JSN SR04T**, l'**A01NYUB** et l'**URM14**.

2.2 Le capteur de température

La mesure de la température de l'air ambiant est assurée par un capteur Dallas Temperature DS18B20 configuré à une résolution de 0.125°C .

2.3 Le banc de test

Le banc de test (Figure 1) est constitué d'un bras en aluminium fixé à l'horizontale, à une certaine hauteur par rapport au sol, sur le montant de la cloison en salle humide. Au bout du bras est fixé l'altimètre à tester, afin de mesurer sa distance au sol. La hauteur est mesurée au mètre, par rapport à l'extrémité du capteur. Afin de mesurer une température proche de celle de la tranche d'air sous le capteur, la sonde de température a été suspendue sous le capteur.

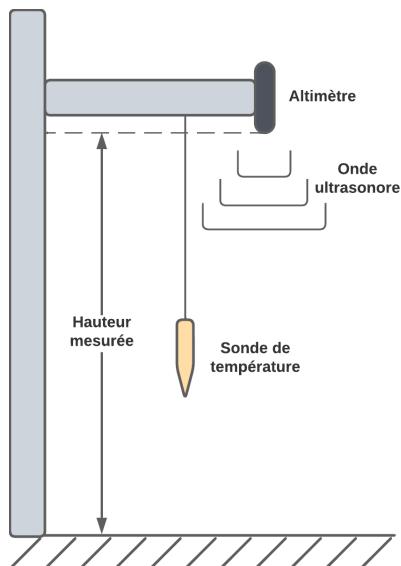


FIGURE 1 – Schéma du banc de test

2.4 Méthode

2.4.1 Justesse et incertitude d'un capteur

Afin de départager les altimètres, leur exactitude a été évaluée. Cette dernière représente la capacité d'un capteur à fournir des mesures proches de la valeur vraie d'une grandeur que l'on essaie de mesurer. Elle peut être séparée en deux composantes : la justesse, et la fidélité.

La justesse caractérise la proximité moyenne des mesures à la valeur vraie. Elle est relative aux erreurs systématiques du capteur (biais, offset) et est caractérisée par l'écart de la moyenne des mesures à la valeur supposée vraie.

La fidélité peut être définie comme la :

“Capacité, pour un détecteur (manomètre, analyseur) à donner une mesure reproducible à partir d'une même grandeur mesurée.”[2]

En d'autres termes plus intelligibles :

“Elle définit la dispersion des résultats. Si on n'effectue qu'une seule mesure, la fidélité représente la probabilité qu'elle soit représentative du résultat moyen.”[4]

Elle est relative aux erreurs aléatoires de mesure et est souvent caractérisée par l'écart type. Elle est également très dépendante de conditions de mesure.

La Figure 2 propose une représentation schématique des composantes de l'exactitude.



FIGURE 2 – Représentation graphique de l'exactitude

L'erreur de mesure d'un capteur peut donc être séparée en un erreur systématique, dite de justesse ; et une erreur aléatoire, caractéristique de la fidélité.

L'erreur systématique, comme son nom l'indique, est identique pour chaque mesure d'une même valeur, quelles que soient les conditions. Elle peut donc être quantifiée et compensée.

L'erreur aléatoire doit être quantifiée statistiquement, et donne lieu à l'incertitude sur la mesure. Cette dernière correspond à un intervalle autour de la mesure, dans lequel se situe statistiquement la valeur vraie. Comme la fidélité, elle est très dépendante des conditions de mesure.

Nous avons donc tenté de quantifier la justesse et l'incertitude des trois capteurs à notre disposition. Pour cela nous avons adopté un raisonnement statistique sur de grands jeux de mesures (évaluation de type A), car notre système nous le permet, plutôt que d'essayer de quantifier les sources d'erreurs (évaluation de type B).

2.4.2 Evaluation de l'incertitude

L'écart de justesse étant compensable, car non aléatoire, la fidélité a constitué notre principal critère de comparaison. De plus, les conditions de mesure utilisées ont permis de réaliser des tests pratiques, permettant de rapidement quantifier l'incertitude et d'identifier les capteurs les plus sujets aux erreurs aléatoires.

L'incertitude, par définition, est un intervalle indépendant des conditions d'utilisation. Pour l'évaluer, il faut donc faire varier un maximum de paramètres, tels que la procédure de mesure, le lieu, le temps de répétition, des paramètres environnementaux (température), pour produire un résultat indépendant de ceux-ci. Ce genre de test étant difficilement réalisable, nous avons choisi de les réaliser dans des conditions relativement proches des conditions d'utilisation des capteurs. Les mesures donc ont été réalisées dans la même salle, sur le même banc de test (Figure ??), situé au même endroit, avec des variations lentes de température comprises entre 21 et 24°C, pendant plusieurs heures, à une fréquence d'acquisition de 1Hz, et à hauteur quelconque, identique entre les tests. Pour un résumé plus visuel des conditions de test, voir le Tableau 2.

Pour départager les capteurs, l'écart type de l'échantillon, la normalité, les valeurs minimales et

Lieu	Compensation en température	Température	Hauteur	Durée	Fréquence d'acquisition
Identique Salle humide Banc de test	Oui	Entre 21 et 24°C Variations lentes	Identique	Plusieurs heures	1Hz

TABLE 2 – Caractéristiques des tests de fidélité

maximales, ainsi que des intervalles à différents niveaux de confiance ont été étudiés. L'écart type de l'échantillon nous renseigne sur la variabilité. Dans le cas d'une distribution normale des mesures, il permet de déterminer avec certitude l'intervalle dans lequel la totalité des mesure se situera, et donc l'incertitude. Dans le cas contraire, il sert uniquement de comparaison avec les autres capteurs. Les valeurs minimales et maximales et les intervalle de confiance ont alors été utilisées pour estimer l'incertitude. A noter que ces estimations sont uniquement valables dans les conditions du test, et peuvent être différentes de celles en conditions réelles.

2.4.3 Evaluation de la justesse

Les tests de justesse ont pour but de quantifier l'erreur systématique entâchant les mesures des capteurs. Celle-ci étant la même pour des mesures d'une même valeur, elle peut donc être compensée. Elle peut néamoins varier en fonction de la valeur de la grandeur mesurée. On peut par exemple imaginer que, en augmentant la hauteur ou la température, cette erreur augmente. Cependant, pour plusieurs mesures à une même hauteur et température, elle reste identique.

Afin d'éliminer les erreurs aléatoires des mesures, et ne conserver que celle de justesse, la moyenne de jeux de mesure a été utilisée comme valeur mesurée par le capteur. Si on réalise plusieurs jeux de mesure à la même hauteur, on remarque que la moyenne calculée n'est pas toujours identique. Ceci souligne le fait qu'elle suit elle aussi une loi de probabilité, et allons donc chercher a minimiser sa variabilité. En considérant un jeu de mesure de taille n , comme une suite de réalisations de variables aléatoires idépendantes et suivant une distribution identique de paramètres (μ, σ^2) , le théorème Central Limite atteste que la moyenne du jeu de mesure suit une loi normale de paramètres $(\mu, \frac{\sigma^2}{n})$. Ayant déterminé l'écart type pour une mesure, lors de l'évaluation de l'incertitude (Section 3.1), on constate alors que pour faire baisser la variabilité de la moyenne, il suffit d'augmenter la taille des jeux de mesures. L'écart type le plus élevé étant de 1.119mm pour le JSN SR04T, des jeux de 120 mesures (soit 2 minutes à 1Hz) permettent alors de concentrer les valeurs entre $\pm 3\sigma = 0.1\text{mm}$.

En réalité, pour caluler la distance, deux grandeurs doivent être mesurées : le temps de parcours de l'onde sonore, et la température de l'air ambiant. Nous pouvons donc séparer l'erreur de justesse en deux composantes, liées à chacune de ces mesures. Pour réduire le temps de réalisation et la complexité des tests, nous avons choisi de les estimer indépendamment, en réalisant deux tests par capteur : un à température constante, et hauteur variable, afin d'évaluer la justesse du capteur même ; et un à hauteur constante, et température variable, afin d'évaluer la qualité de la compensation de température. Les erreurs déterminées serviront à corriger la mesure de temps et la compensation de température. Pour quantifier l'erreur de justesse sur les plages de mesures des capteurs, nous allons donc réaliser pour chaque capteur, des jeux de 120 mesures, à différentes hauteurs. Les incrément de hauteur ont été définis arbitrairement à 10cm pour l'URM14, et 50cm pour le JSN SR04T et l'A01NYUB, afin de parcourir l'entièreté des plages de mesure, sans demander trop de temps.

Le tracé des écarts des moyennes calculées aux valeurs considérées vraies, par rapport à ces dernières, permettra de représenter l'évolution des erreurs de justesse sur la plage de mesure des capteurs. La détermination de l'équation régissant ces écarts permettra de compenser les compenser.

2.5 Exposition au soleil

Les altimètres ultrarasonores sont sensibles au rayonnement solaire. Si exposés directement à celui-ci, ils chauffent plus que l'air ambiant. La température qu'ils mesurent n'est donc plus la bonne et la valeur fournie par le capteur se retrouve faussée.

La méthode à suivre pour évaluer le comportement des capteurs au soleil n'a pas encore été définie.

3 Résultats

3.1 Evaluation de l'incertitude

L'objectif de ces tests est de quantifier l'incertitude des capteurs, afin de les comparer leur fidélité, et ensuite travailler sur leur justesse et leur compensation de température.

Avant de comparer les trois capteurs, le mode de compensation de température introduisant le moins de variabilité a d'abord été identifié chez l'URM14. Deux tests ont donc été réalisés dans les conditions décrites Section 2.4.2, l'un en compensation interne, et l'autre en compensation externe avec un DS18B20. La Figure 3 présente la répartition des écarts des mesures à leur moyenne, pour ces deux sources de température. Avec le Tableau 3, ils permettent de constater que la compensation interne au capteur est la méthode donnant les résultats les plus fidèles. Cette dernière a donc été utilisée pour la comparaison avec le reste des capteurs.

On peut également remarquer une phase transitoire durant la première heure d'acquisition sur les deux jeux de mesures. Elle est décroissante pour la compensation externe, et croissante et représentant une grande partie de la variabilité, pour la compensation interne.

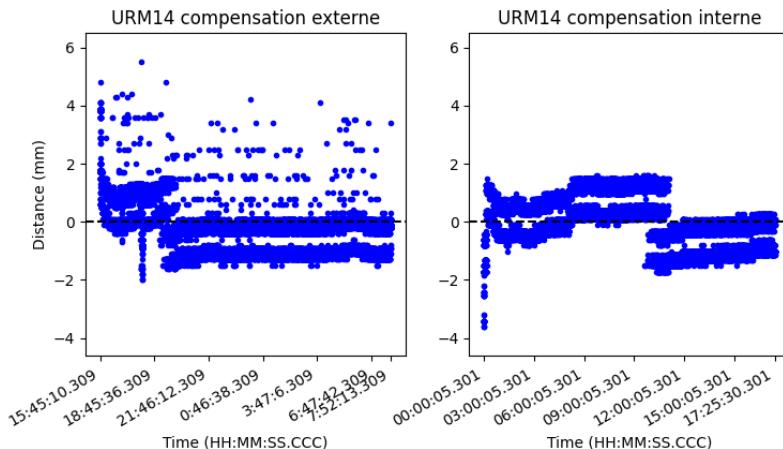


FIGURE 3 – Ecarts à la moyenne des mesures de l'URM14 en compensation interne et externe de température

	Compensation externe	Compensation interne
Ecart type (mm)	0.642	0.802
Min/Max (mm)	-2 / 5.5	-3.62 / 1.58

TABLE 3 – Comparaison de la variabilité introduite par les compensation de température de l'URM14.

La Figure 4 présente la répartition des écarts à la moyenne des mesures, pour les trois capteurs au cours des tests.

Le Tableau 4 présente la synthèse statistique des écarts à la moyenne du test.

Les histogrammes et les tests de Kolmogorov-Smirnov permettent de constater qu'aucun des jeux de données ne suit de loi normale. L'écart type ne sert alors que de comparaison, et ce sont

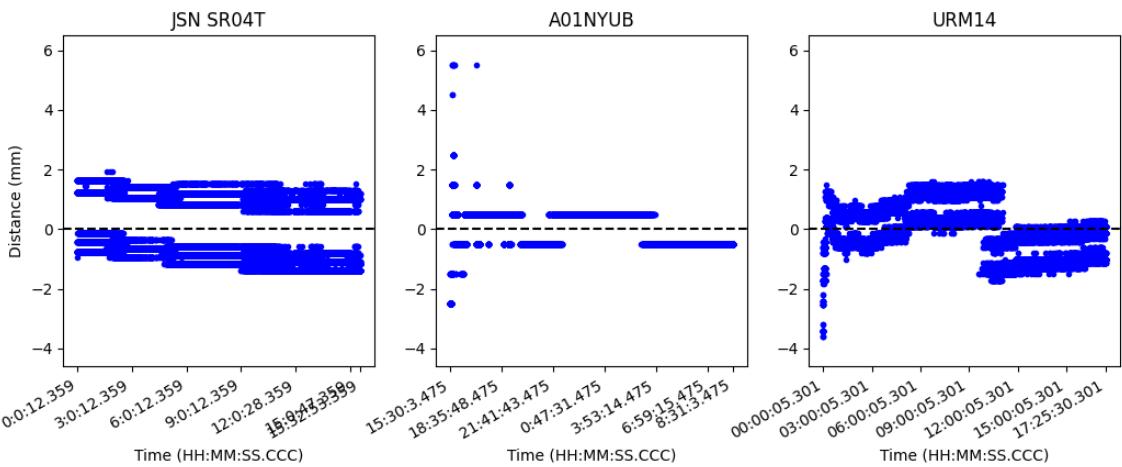


FIGURE 4 – Répartition des écarts à la moyenne

Les écarts supérieurs à 6mm de l'A01NYUB, ne représentant que deux valeurs, ont été omis sur ce graphique.

	JSN SR04T	A01NYUB	URM14
Date	27/07/2023	19/07/2023	26/07/2023
Plage horaire	De 0:00:12 à 15:32:53	De 15:30:03 à 8:31:03	De 0:00:05 à 17:25:30
Taille de l'échantillon	55 897	59 337	62 726
Ecart type (mm)	1.119	0.542*	0.802
Distribution			
Test KS Statistique / p-valeur	0.22 / 0.0	0.33 / 0.0	0.39 / 0.0
Min / Max (mm)	-1.400 / 1.947	-2.497 / 25.503	-3.617 / 1.582
Intervalle de confiance à 100%	±1.947	±25.503	±3.617
Intervalle de confiance à 99.9%	±1.65	±2.5	±1.72
Intervalle de confiance à 95%	±1.52	±0.51	±1.32
Valeurs aberrantes Nombre / %	30 / 0.05%	1924 / 3.24%	165 / 0.28%

TABLE 4 – Synthèse statistique des écarts à la moyenne, par capteur

* Les écarts supérieurs à 6mm de l'A01NYUB, ne représentant que deux valeurs, ont été omis pour le calcul de l'écart type, car il est sensible aux grands écarts ; et sur les histogrammes pour mieux visualiser l'étalement des mesures. Le résultat produit est plus représentatif de la variabilité du capteur. Elles ont néanmoins été prises en compte pour le calcul de la moyenne et des intervalles de confiance.

Les bornes des intervalles de confiance ont été calculées à partir des proportions, et non des écarts types.

les intervalles de confiance qui serviront à estimer l'incertitude. Ces derniers montrent que 100% des mesures du JSN SR04T sont comprises entre $\pm 1.947\text{mm}$, celles de l'A01NYUB entre $\pm 25.503\text{mm}$, et celles de l'URM14 entre $\pm 3.617\text{mm}$. Les bornes de ces intervalles décroissent plus ou moins vite, en fonction du capteur, avec la proportion de mesure souhaitée. La décroissance la plus rapide est constatée chez l'A01NYUB, avec 99.9% des mesures comprises entre $\pm 2.5\text{mm}$, et 95% entre $\pm 0.51\text{mm}$. Il est suivi de l'URM14, pour lequel 99.9% des mesures sont contenues dans l'intervalle $\pm 1.72\text{mm}$, et 95% dans $\pm 1.32\text{mm}$. Enfin, 99.9% des valeurs du JSN SR04T sont comprises entre $\pm 1.65\text{mm}$, et 95% entre $\pm 1.52\text{mm}$. On constate également une perte de mesures de 3.24% chez l'A01NYUB, pourtant quasi nulle chez les autres capteurs.

3.2 Evaluation de la justesse

Ces tests n'ont pas encore été réalisés.

3.3 Exposition au soleil

Ces tests n'ont pas encore été réalisés.

4 Discussion

4.1 Evaluation de l'incertitude

Les tests d'incertitude ayant montré que les jeux de mesures ne sont pas normalement distribués. Des intervalles de confiance, représentatifs de l'incertitude compte tenu de la taille des jeux de mesures, ont donc été calculés.

Les résultats des intervalles de confiance permettent de conclure que, pour un intervalle contenant 100% des mesures, le JSN SR04T est notre meilleur capteur. Cependant, lorsqu'on diminue le niveau de confiance, on constate que l'A01NYUB est nettement plus fidèle que ses concurrents. L'URM14, le plus cher de ces capteurs, ne semble pas pouvoir rivaliser avec le JSN SR04T pour des niveaux de confiance à 100% et 99.9%, ni avec l'A01NYUB à 95%.

Grâce à la compensation de l'erreur de justesse, les capteurs seront calibrés par rapport à la moyenne de leurs mesures. Pour des mesures ponctuelles, l'A01NYUB peut donc être utilisé, au risque de mesurer avec une erreur de 25.503mm dans 5% des cas, ou de ne pas obtenir de valeur dans 3.24% des cas. Les répartitions des mesures du JSN SR04T et de l'A01NYUB étant relativement symétriques, on peut imaginer moyenner plusieurs mesures pour estimer la valeur vraie. Cependant, plus le nombre de mesure est grand, plus il y a de chance d'obtenir une valeur de l'A01NYUB en dehors son intervalle à 95%.

Ces incertitudes ne sont valables que pour les conditions dans lesquelles ont été réalisés les tests. Celles-ci ont été choisies pour être relativement proches des conditions d'utilisation des capteurs, mais ne sont néanmoins pas identiques.

4.2 Evaluation de la justesse

Aucun résultat pour le moment.

4.3 Exposition au soleil

Aucun résultat pour le moment.

Sources documentaires

- [1] *Fiche technique - Caractéristiques statistiques des capteurs.* URL : https://www.google.com/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=0CDgQw7AJahcKEwjQqbnYitSAAxAAAAAHQAAAAAQAw&url=https%3A%2F%2Fwww.newsteo.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2019%2F07%2FFICHE_TECHNIQUE-capteur_metrologie__Precision__incertitude.docx&psig=A0vVaw1Ff1R09Au-AeGE8dYlljsM&ust=1691825346774180&opi=89978449 (visité le 04/08/2023).
- [2] *Justesse d'un capteur : Définition.* URL : <https://www.techniques-ingénieur.fr/glossaire/justesse-d-un-capteur> (visité le 18/07/2023).
- [3] Philippe MEYNE. *Fiche technique - Caractéristiques statistiques des capteurs.* Université Paris 12 Val de Marne. 2008. URL : <http://pv.meyne.free.fr/Capteur/Generalites.pdf> (visité le 04/08/2023).
- [4] *Qualité métrologique d'un appareil de mesure.* URL : https://fr.wikipedia.org/wiki/Qualit%C3%A9_m%C3%A9trologique_d%27un_appareil_de_mesure (visité le 18/07/2023).