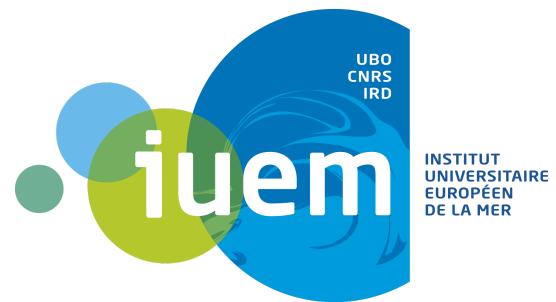
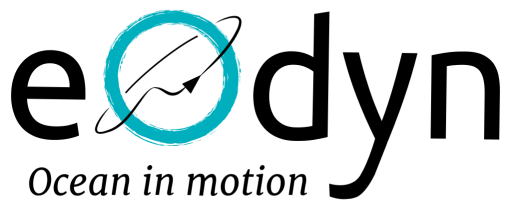




RAPPORT STAGE ASSISTANT-INGÉNIEUR PRINTEMPS 2025 (17 février - 15 juin)



Arthur CORDIER--LE PETIT

**Développement d'un capteur de conductivité de type
inductif et intégration dans la bouée MELODI**

Tuteur de stage: M. Lucas CHARRON

Enseignant référent: M. Thierry RAMPONE

Établissement de formation: École Nationale d'Ingénieurs de Brest

Entreprise d'accueil: eOdyn, 115 rue Claude Chappe 29280 Plouzané.

1. Remerciements

Je tiens à remercier les personnes qui ont permis la réalisation de mon stage dans les meilleures conditions possibles.

Tout d'abord, j'adresse mes sincères remerciements à **Lucas Charron**, mon maître de stage, pour son accueil, sa confiance et son encadrement tout au long de cette expérience. Son expertise et ses retours constructifs m'ont permis de progresser, d'affiner mon travail et d'acquérir de nouvelles compétences.

Je remercie vivement **eOdyn** pour m'avoir intégré dans un environnement de travail enrichissant et collaboratif. Cette immersion a été une véritable opportunité d'apprentissage et de développement professionnel.

Je tiens également à remercier **I'UEM (Institut Universitaire Européen de la Mer)** de m'avoir fourni différentes solutions pour la calibration du capteur et la possibilité d'avoir accès à leurs labo pour faire plusieurs tests sur leurs appareils.

Merci à **Paco Bizet**, étudiant à l'ENIB, qui a eu l'occasion de faire son stage ingénieur chez eOdyn avant moi et qui est employé là bas actuellement. C'est lui qui m'a mis en relation avec eux.

Je remercie enfin toutes les personnes m'ayant conseillé et relu lors de la rédaction de ce rapport de stage.

2. Résumé/Abstract

1. Français

Lors de mon stage de 6 mois au sein de l'entreprise eOdyn à Brest, en tant que stagiaire ingénieur, j'ai eu l'opportunité de travailler sur un projet de recherche et développement innovant : la conception d'un capteur de salinité basé sur la conductimétrie inductive. Ce projet m'a permis d'atteindre plusieurs objectifs techniques tels que la modélisation physique du principe de mesure, le développement d'un circuit électronique adapté et son intégration sur un PCB, l'acquisition et la transmission de données via un microcontrôleur STM32, ainsi que le traitement numérique du signal (FFT) pour l'extraction de la conductivité.

J'ai développé des compétences techniques en électronique analogique et numérique, en programmation embarquée sur STM32 avec STM32CubeIDE, ainsi qu'en traitement du signal pour convertir les tensions mesurées en valeurs de conductivité. J'ai également travaillé sur l'intégration de capteurs de température (TMP119) et de pression (MS5837) sur un circuit imprimé dédié, dans le but de fournir des mesures complètes et fiables du milieu marin. L'ajout d'une mémoire EEPROM, est également envisagé afin de permettre l'enregistrement autonome des mesures.

Ce stage m'a également permis de renforcer mes compétences en gestion de projet technique. J'ai su organiser mon travail de manière autonome — une qualité particulièrement attendue par mon maître de stage — structurer les différentes étapes du projet (étude, prototypage, tests), documenter les résultats, et proposer des améliorations itératives en fonction des retours et des mesures effectuées.

Sur le plan humain, l'intégration au sein de l'équipe eOdyn s'est faite naturellement, grâce à une ambiance de travail bienveillante. J'ai pu exprimer mes idées, recevoir des conseils précieux, et gagner en confiance dans mes capacités techniques et relationnelles.

Je suis très reconnaissant envers mon maître de stage et l'ensemble des employés de l'entreprise pour la confiance qu'ils m'ont accordée et l'aide qu'ils m'ont apportée tout au long de mon stage. Ce fut une expérience très enrichissante, qui m'a beaucoup appris et conforté dans mon choix de m'orienter vers l'ingénierie appliquée à l'environnement marin et aux systèmes embarqués.

2. Anglais

During my 6-month internship at eOdyn in Brest, I had the opportunity to work as an engineering intern on an innovative research and development project: the design of a salinity sensor based on inductive conductivity measurement. This project allowed me to achieve several technical goals such as modeling the physical measurement principle, developing a suitable electronic circuit and integrating it onto a PCB, acquiring data via an STM32 microcontroller, and performing digital signal processing (FFT) to extract the conductivity.

I developed technical skills in both analog and digital electronics, embedded programming on STM32 using STM32CubeIDE, as well as signal processing to convert measured voltages into conductivity values. I also worked on the design and integration of temperature sensors (TMP119) onto a dedicated PCB, in order to provide reliable and comprehensive environmental measurements for marine applications. An extension project involving the addition of EEPROM memory was also considered, to enable autonomous data logging.

This internship also strengthened my technical project management skills. I was able to work independently — a key expectation from the company — structure the project into different stages (study, prototyping, testing), document the results, and suggest iterative improvements based on feedback and measurements.

On a human level, I quickly felt integrated into the eOdyn team thanks to a positive and supportive work environment. I was able to share my ideas, receive valuable advice, and gain confidence in both my technical and interpersonal abilities.

I am very grateful to my internship supervisor and to all the employees at eOdyn for the trust they placed in me and the support they provided throughout this experience. This internship was extremely rewarding, taught me a great deal, and confirmed my desire to pursue a career in marine environmental engineering and embedded systems.

Table des matières

1. Remerciements	3
2. Résumé/Abstract	4
1. Français	4
2. Anglais	5
3. Table des illustrations	8
4. Glossaire	9
5. Introduction	10
6. Présentation de l'entreprise	11
1. L'entreprise	11
2. L'équipe	12
3. Etude RSE	12
7. Organisation du temps	13
8. Contexte et Objectifs techniques	14
9. Présentation du projet	15
10. Principe de fonctionnement physique	18
1. Principe de la conductimétrie inductive	18
2. Schéma de principe (bobine émettrice, réceptrice, courant induit)	19
3. Avantages vs capteurs à électrodes	20
11. Développement du circuit de mesure	20
1. Génération du signal sinusoïdal (STM32, DAC, Timer, DMA)	20
2. Schéma du montage électronique (LM358, couplage, filtre)	22
12. Conception matérielle et intégration	25
1. Test bobines et validation du circuit sur breadboard	25
2. Composants intégrés (TMP119, EEPROM)	26
13. Acquisition et traitement embarqué	28
1. Configuration de l'ADC (double canal, fréquence d'échantillonnage)	28
2. Traitement du signal	29
14. Calibration et calcul de la conductivité	31
1. Solutions utilisées (robinet, 28.9mS/cm, 53.5mS/cm)	31
2. Conversion en conductivité, calibration	31
15. Tests expérimentaux	33
1. Présentation des résultats (graphes FFT, tension, conductivité estimée)	33
2. Conditions de tests (eau statique, agitation, température)	37
3. Évaluation des performances (précision, temps de réponse)	37
16. Limites et problèmes rencontrés	39
1. Problème d'ADC1 faussé	39
2. Problème de génération de la sinusoïde via le DAC+DMA	39
3. Comportement non conforme du montage convertisseur courant-tension	40

4. Limites de la calibration physique par formule analytique	41
5. Problème de comportement inattendu du nouvel amplificateur opérationnel (MCP602)	41
17. Perspectives futures	42
1. Intégration à la bouée MELODI	42
2. Extension mémoire EEPROM pour autonomie	42
3. Validation terrain avec l'IUEM / campagnes futures	43
18. Conclusion	43
1. Bilan technique	43
2. Bilan humain et organisationnel	44
3. Bilan personnel	44
19. Bibliographie / Webographie	45
20. Annexes	47

3. Tables des illustrations

TABEAU 1 : EXIGENCES FONCTIONNELLES DU CAPTEUR DE SALINITÉ	12
FIGURE 1 : FONCTIONNEMENT BOBINES INDUCTIVES	17
FIGURE 2 : SCHÉMA DU CAPTEUR DE CONDUCTIVITÉ	18
FIGURE 3 : SCHÉMA DU CIRCUIT ÉLECTRONIQUE.....	21
FIGURE 4 : TEST BOBINE ET COQUE CAPTEUR	23
FIGURE 5 : CIRCUIT PCB	24
FIGURE 6 : PCB IMPRIMÉ	25
FIGURE 7 : SÉPARATION DANS DEUX TABLEAUX DISTINCTS	27
FIGURE 8 : CHAÎNE DU TRAITEMENT DE SIGNAL	28
FIGURE 9 : FFT SUR SIGNAL ENTRÉE CAPTEUR	31
FIGURE 10 : FFT - SORTIE CAPTEUR, SOLUTION 28.9mS/cm	31
FIGURE 11 : FFT - SORTIE CAPTEUR, SOLUTION 53.5mS/cm	32
FIGURE 12 : AMPLITUDE CRÊTE À CRÊTE SIGNAUX DANS 28.9mS/cm et 53.5mS/cm	33
FIGURE 13 : VALEURS MESURÉ DANS 28.9mS/cm et 53.5mS/cm	34

4. Glossaire

A

AIS : Automatic Identification System, système automatisé d'échange d'informations maritimes utilisé pour transmettre en temps réel position, vitesse et d'autres données de navigation, principalement à des fins de sécurité et de surveillance.

C

CAO : Conception Assistée par Ordinateur, permet de modéliser un système en 3D

E

EEPROM : Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory, Une mémoire non volatile permettant d'effacer et de réécrire des données électriquement, tout en conservant les informations sans alimentation.

F

FFT : Transformation de Fourier Rapide, Un algorithme efficace pour convertir rapidement un signal du domaine temporel au domaine fréquentiel.

L

Low-tech : Désigne des technologies simples, durables, et accessibles, conçues pour être facilement réparables et avoir un faible impact environnemental.

O

open source : Source ouverte, un projet Open Source est un projet qui peut-être utilisé par qui le veut

P

PCB : Printed Circuit Board : circuit imprimé, carte électronique plaque qui permet de relier différents composant ensemble.

S

SaaS : Software as a Service, Un logiciel hébergé en ligne, accessible via Internet, avec des mises à jour automatiques et souvent proposé sous forme d'abonnement.

5. Introduction

J'ai eu l'opportunité de réaliser mon stage de fin de quatrième année en Recherche et Développement au sein de l'entreprise **eOdyn**, une société brestoise spécialisée dans l'exploitation de données maritimes et l'intelligence océanique. Ce stage a porté sur la conception d'un capteur de conductivité low-tech et open-source basé sur la conductimétrie inductive dans le but de mesurer la salinité d'une solution, un projet innovant s'inscrivant pleinement dans les problématiques de surveillance et de compréhension du milieu marin.

Ce choix de stage répondait à plusieurs objectifs personnels et professionnels. Passionné par les environnements marins et les systèmes embarqués, j'ai vu dans ce projet l'opportunité d'approfondir mes compétences techniques en électronique, traitement du signal et programmation embarquée, tout en contribuant à une application concrète liée à l'océan. Réaliser ce stage à Brest, au cœur d'un écosystème riche en recherche océanographique, était également une manière d'explorer un secteur qui m'attire particulièrement et de me projeter dans une carrière liée à l'ingénierie environnementale.

Après un premier contact avec Lucas Charron, ingénieur électronicien d'eOdyn, qui est également mon maître de stage, et la présentation de son projet en cours, j'ai immédiatement été séduit par l'ambition de concevoir un capteur innovant, capable de mesurer la conductivité de l'eau de mer de manière autonome et précise. Ce projet, à la fois technique et expérimental, correspondait parfaitement à mes attentes et aux compétences acquises durant ma formation à l'ENIB.

Afin de restituer la richesse de ce stage, tant sur le plan professionnel que personnel, je présenterai dans un premier temps l'entreprise eOdyn, son positionnement, ses activités et ses enjeux. Je décrirai ensuite le projet de capteur de conductivité sur lequel j'ai travaillé, les différentes étapes de sa réalisation, les compétences mobilisées et les défis rencontrés. Puis avant de conclure sur un bilan, je parlerai des problèmes que j'ai rencontrés durant ce stage.

6. Présentation de l'entreprise

1. L'entreprise

Fondée en 2015 et basée à Plouzané, **eOdyn** est une entreprise technologique française spécialisée dans l'observation et l'analyse des dynamiques océaniques en temps réel. Grâce à son expertise unique, eOdyn propose des solutions innovantes qui permettent de mieux comprendre les courants de surface marins, avec des applications concrètes dans les domaines du transport maritime, de l'énergie offshore, de la recherche scientifique et de la préservation de l'environnement.

L'entreprise s'appuie sur une technologie brevetée nommée **Omni-Situ**, qui exploite les données issues du système AIS (Automatic Identification System). Ce système, obligatoire sur les navires de commerce, transmet en temps réel la position et la vitesse des bateaux. En analysant les dérives de ces navires par rapport à leur cap, eOdyn est capable d'estimer les courants de surface, et ce, sans déployer de capteurs physiques en mer. Cela permet d'obtenir une vision globale, continue et à faible coût des courants marins.

Parmi ses produits phares, eOdyn a développé la plateforme **SeaOps**, un outil SaaS à destination des professionnels de la mer. Cette solution fournit aux opérateurs une visualisation en temps réel des conditions océaniques (courants, vagues, états de mer) pour améliorer la sécurité et réduire la consommation de carburant des navires. Les données fournies par eOdyn permettent en effet d'optimiser les routes maritimes, avec jusqu'à 3 % d'économie de carburant par navire, ce qui représente un levier important de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

eOdyn est également engagée dans des projets de recherche océanographique. Elle a conçu la bouée **MELODI** (Miniaturized Electronics Lagrangian Oceanographic Drifter), une bouée autonome permettant de collecter des données in situ sur les vagues, les courants, la température de surface de l'eau et bientôt sa salinité. Éco-conçues pour minimiser leur impact environnemental, elles ont notamment été utilisées lors du Vendée Globe en partenariat avec le navigateur Fabrice Amedeo, pour collecter des données précieuses dans des zones reculées comme l'océan Austral.

Enfin, eOdyn participe à des projets internationaux en collaboration avec l'Agence Spatiale Européenne (ESA), l'IFREMER et d'autres institutions scientifiques. Les données issues des bouées MELODI sont notamment utilisées pour la calibration des satellites d'observation océanique, comme la mission SWOT (Surface Water and Ocean Topography).

2. L'équipe

Avec un effectif de 8 personnes, composé d'ingénieurs et de chercheurs, eOdyn offre également des opportunités à des doctorants et des stagiaires.

L'équipe est composée de Yann Guichoux, le co-fondateur et PDG de l'entreprise, Gwenaële Jan, la directrice scientifique, Alexey Mironov, chercheur et ingénieur en télédétection océanique, Lucas Charron, ingénieur d'instrumentation et design, Klet Jegou et Julien Vitray, ingénieur en traitement de données, Paco Bizet, Guillaume Delaunay et Hippolyte Jean, ingénieurs logiciels. L'équipe est également composée de plusieurs stagiaires qui travaillent sur des sujets très variés que ce soit en électronique ou en informatique.

Julien et Yann travaillent directement avec la donnée, ils développent des algorithmes de calcul et de mesure sur les courants. Lucas et Alexey travaillent majoritairement sur les bouées dérivantes produites par eOdyn. Paco, Guillaume et Hippolyte s'occupent de tout le système informatique, comprenant la gestion et le stockage de la donnée, la chaîne de traitement, mais aussi des solutions techniques permettant de faciliter le travail des autres membres de l'équipe. Klet apporte son expertise sur les chaînes de traitement.

Pour ma part j'ai rejoint Lucas sur le développement du capteur de conductivité.

3. Etude RSE

Dans le cadre de mon stage, j'ai effectué une étude des engagements RSE (Responsabilité Sociétale des Entreprises) de l'entreprise eOdyn, une PME innovante implantée à Plouzané, au cœur du Technopôle Brest-Iroise.

L'activité d'eOdyn s'inscrit pleinement dans une démarche de durabilité. En valorisant des données existantes (AIS), l'entreprise évite le déploiement de capteurs supplémentaires en mer, réduisant ainsi son impact environnemental. Par ailleurs, ses services permettent aux armateurs d'optimiser les trajets maritimes et de réduire la consommation de carburant, contribuant indirectement à la baisse des émissions de gaz à effet de serre du secteur maritime.

L'innovation est au cœur de la stratégie d'eOdyn. L'entreprise collabore régulièrement avec des instituts de recherche comme l'Ifremer et IMT Atlantique, ainsi qu'avec l'Agence Spatiale Européenne (ESA), dans le cadre de projets visant à mieux comprendre et surveiller les océans. Ces partenariats garantissent un développement technologique encadré par des objectifs scientifiques et éthiques clairs.

Implantée localement, eOdyn est un acteur actif de l'écosystème maritime breton. Elle participe à des événements comme la Sea Tech Week et travaille avec des structures régionales, notamment dans le domaine de la communication responsable. L'ancrage territorial de l'entreprise s'exprime également dans son implication dans des réseaux d'innovation régionaux et sa volonté de développer des technologies utiles au tissu économique local.

L'entreprise agit concrètement en faveur de l'environnement marin, encourage une innovation technologique utile et respectueuse, et s'inscrit dans une logique de développement local durable. Cette orientation est cohérente avec les enjeux contemporains liés à l'économie bleue et à la transition écologique du transport maritime.

7. Organisation du temps

Afin d'optimiser ma performance et d'éviter les pertes de temps dans l'exécution des tâches qui m'ont été confiées dans l'entreprise, j'ai mis en place des méthodes d'organisation du temps en utilisant différents outils. Cependant, j'ai rencontré des difficultés pour planifier à moyen et long terme. Compte tenu de la liberté qui m'a été accordée durant mon stage, j'ai dû gérer mon temps de manière totalement autonome, organiser mes tâches quotidiennes, planifier certaines commandes à passer (composants/PCB), les impressions 3D à réaliser, et déterminer l'ordre dans lequel les réaliser. La planification des tâches s'est donc faite de manière naturelle. Pour faciliter l'enchaînement des tâches, j'ai mis en place un diagramme de GANTT (Annexe 1 : Diagramme de Gantt)

8. Contexte et objectifs techniques

La salinité est après la pression et la température une variable physique fondamentale du milieu marin. Cependant, sa mesure principalement dérivée des mesures de conductivité et température est beaucoup plus complexe.

S'il est facile d'acquérir, de recycler ou de fabriquer des sondes P,T (Pression, Température), il l'est beaucoup moins pour les CTD (*Conductivity, Temperature, Depth*). Elles sont plus chères (premier prix: 1500€, CTD-Diver) et plus difficiles à étalonner en conductivité.

Pour répondre aux besoins d'observations des pays du Sud partenaires de l'IRD, des chercheurs et doctorants de l'IUEM, des citoyens investis en sciences participatives (Astrolabe Expéditions), il devient crucial de réussir à fabriquer une sonde CTD low-cost et open-source de qualité. De même la société eOdyn, dans le cadre du développement de ses bouées de surface, cherche à ajouter cette variable aux paramètres déjà mesurés.

Les capteurs de conductivités low-cost du commerce sont principalement à deux électrodes (Atlas scientifique). Cette technologie peut convenir en eau douce mais ne donne pas satisfaction aux niveaux de conductivité de l'eau salée (env. 50 mS/cm @ 25°C) à cause du phénomène de polarisation. En revanche, les capteurs de conductivité à 4 électrodes sont meilleurs dans les conditions dites salées (> 10 g/L). A notre connaissance, il n'existe pas de capteurs low-cost à 4 électrodes et d'électronique associée commercialisés sur le marché à un coût raisonnable ([50-150€]). Il faut bien souvent acheter le capteur 4 électrodes d'un côté (env. 70€) et concevoir l'électronique pour le piloter de l'autre côté. Ceci exige des compétences qui font défaut à l'IUEM. Loin d'être parfaits les capteurs à 4 électrodes sont aussi impactés par la polarisation, les biosalissures, la dilatation thermique des matériaux etc... [La page du groupe DIY oceano bzh](#) regroupe un peu de documentation sur le sujet.

Dans ces conditions, il devient intéressant d'explorer la faisabilité d'un capteur de salinité low-cost basé sur un principe de mesure de la conductivité différent. En effet, il est possible de mesurer la conductivité par technique inductive. Ceci est déjà largement employé actuellement par exemple par la société RBR leader mondial des sondes océanographiques autonomes. Cette technologie présente l'avantage d'être moins sensible aux biosalissures et plus robuste.

Ce stage a été proposé fin 2024 par eOdyn sur ce sujet avec une dimension importante aux yeux des deux entreprises collaboratrices : **l'open source**. L'IUEM a donc contacté l'entreprise eOdyn dans l'idée de collaborer à leur projet. En toile de fond, il y a l'idée de faire preuve d'un échange de bons procédés, de joindre leurs efforts en vue d'atteindre un but commun. eOdyn a le savoir-faire électronique qui fait défaut à l'IUEM pour concevoir ce capteur. Cependant, ils ont des équipements de mesure haut de gamme pour le valider. Ils ont donc décidé de s'associer pour collaborer à la mise au point d'un capteur de conductivité low-cost et open-source.

9. Présentation du projet

Le stage, d'une durée initiale de six mois, avait pour objectif principal le développement d'un capteur de salinité low-cost et open-source destiné à être embarqué sur la bouée MELODI développée par eOdyn. Ce capteur devait permettre la mesure conjointe de la conductivité électrique de l'eau et de sa température, afin de calculer la salinité à l'aide des formules standards de l'océanographie.

Le projet s'est articulé autour de trois axes principaux :

1. Conception d'un système de mesure embarqué

L'objectif était de concevoir un capteur intégrant :

- Un circuit analogique inductif pour la mesure de la conductivité, basé sur deux bobines couplées via l'eau à analyser.
- Une chaîne d'acquisition numérique, permettant la conversion du signal mesuré (tension) par le biais d'un microcontrôleur STM32 (conversion analogique-numérique, FFT, extraction du signal utile).
- Un capteur de température numérique, de type TMP119. Il est important de remarquer que le capteur de température (T) et celui de conductivité (C) donc le circuit de bobines sont au plus proche l'un de l'autre pour garantir la cohérence temporelle. En effet, une mesure de C sans valeur de T associée ne permet pas de déduire la salinité. On exprime toujours C à T (aussi noté parfois C @ T).
- Un système de communication embarqué, assurant l'envoi des données (C, T, S) vers l'extérieur via une liaison UART, avec possibilité d'extension à d'autres protocoles.

2. Validation métrologique

Le système devait répondre à des critères de performance définis dans un cahier des charges, notamment en termes de :

- Précision et résolution en température (± 0.05 °C, 0.01 °C) ;
- Précision et gamme de conductivité ([0–70 mS/cm], ± 0.15 mS/cm) ;
- Précision sur la salinité calculée ([2–42 PSU], ± 0.1 PSU).

Des tests de calibration et de validation devaient être menés à l'aide de solutions étalon fournies par l'IUEM.

3. Intégration et test en conditions réelles

Le capteur devait être conçu de manière à pouvoir être :

- Intégré dans la bouée MELODI d'eOdyn pour une mesure en surface ;
- Ou installé sur une sonde CTD OSO de l'IUEM pour des tests verticaux en colonne d'eau.

DESCRIPTION FONCTIONNELLE

Afin de guider la conception et d'assurer la cohérence du développement avec les besoins de l'entreprise et des partenaires académiques, un ensemble d'exigences fonctionnelles a été défini pour le capteur. Celles-ci concernent à la fois les performances de mesure (conductivité, température, salinité), la fréquence d'acquisition, la précision attendue, ainsi que les modalités de communication des données.

Ces spécifications, présentées dans le tableau 1, constituent la base du cahier des charges auquel devait répondre l'architecture matérielle et logicielle du système.

Fonctions principales	Critères-niveaux
Le capteur doit mesurer et transmettre la conductivité	gamme: [0-70 mS/cm] résolution: 0.05 mS/cm exactitude: +/- 0.15 mS/cm sur [10-60 mS/cm] temps de réponse: <0.5 sec (à 80% de la valeur cible) fréquence de mesure : [1s-1h] Unités : mS/cm

	C'est la conductivité brute qui sera transmise et non la conductivité spécifique qui elle est rapportée à 25°C
Le capteur doit mesurer et transmettre la température Intégration d'un capteur de température TMP119	gamme: [-5 - 35 °C] résolution: 0.01 °C exactitude: +/- 0.05 °C temps de réponse: <0.5 sec (à 80% de la valeur cible) fréquence de mesure: [1s-1h] unités: °C La capteur de température est monté au plus proche du capteur de conductivité. Du fait de l'inertie thermique des matériaux, son temps de réponse est plus lent que la mesure de conductivité. Un soin sera apporté à trouver un capteur de température de type "fast response" qui devra être le plus rapide possible car c'est lui qui donnera la cadence.
Le capteur doit calculer et transmettre la salinité à partir de C et T	gamme: [2-42 PSU] résolution: 0.01 PSU exactitude: +/- 0.1 PSU temps de réponse: <0.5 sec (à 80% de la valeur cible) fréquence de mesure: [1s-1h] unités: g/L Utilisation de la formule avec standard UNESCO
Le capteur doit transmettre les données qu'il mesure/calculé	Les trames seront au format SMBus/I2C Elles seront au format ASCII. L' UART peut être une option en plus. C'est la Firebeetle équipée du CHIP ESP32 qui est utilisée actuellement dans les projets IUEM.

TABEAU 1 : EXIGENCES FONCTIONNELLES DU CAPTEUR DE SALINITÉ

La suite du rapport détaille les principes physiques, les choix techniques et les étapes de conception qui ont permis de se rapprocher au plus proche de ces objectifs.

10. Principe de fonctionnement physique

1. Principe de la conductimétrie inductive

La conductimétrie inductive repose sur l'utilisation de deux bobines disposées de manière coaxiale autour d'un conduit contenant le liquide que l'on souhaite analyser. Elle permet de mesurer la conductivité de ce fluide sans contact direct avec les électrodes, ce qui est particulièrement avantageux dans les milieux marins exposés à la corrosion et aux biofilms et permet une certaine efficacité dans le temps.

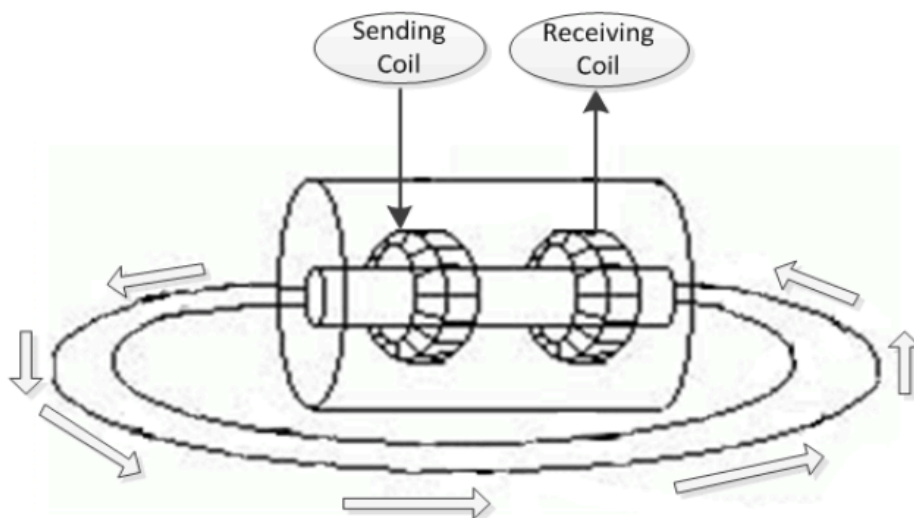


FIGURE 1 : FONCTIONNEMENT BOBINES INDUCTIVES

Le capteur de conductivité inductif fonctionne selon le principe de l'induction électromagnétique. Une bobine émettrice, alimentée par un signal sinusoïdal de 10 kHz et 0,5V d'amplitude, génère un champ magnétique variable au sein du capteur. Ce champ traverse le liquide à mesurer, ce qui induit des courants de Foucault. Ces courants génèrent à leur tour un champ magnétique secondaire, qui est capté par une bobine réceptrice. Il est impératif d'exciter la bobine émettrice avec un signal alternatif et non une tension constante car on sait grâce à la loi de Faraday qu'une tension est induite dans une bobine uniquement si le champ magnétique qui la traverse varie dans le temps.

La tension induite dans la bobine réceptrice dépend du courant induit dans le fluide, donc directement de sa conductivité. Plus le fluide est conducteur, plus les courants induits sont intenses, et plus la tension mesurée en sortie est élevée. Cette tension est ensuite exploitée grâce à l'ADC (convertisseur analogique-numérique) du microprocesseur pour déterminer la conductivité.

Afin d'isoler le fondamental (10 kHz) du spectre du signal, une transformation de Fourier rapide (FFT) est appliquée sur les échantillons collectés. L'amplitude du pic spectral permet d'obtenir une valeur de tension précise et donc un indicateur direct du couplage magnétique. Cela permet d'en déduire la conductivité du liquide dans lequel le capteur est plongé.

Ce système présente une bonne sensibilité aux variations de conductivité, tout en étant robuste et insensible aux effets de polarisation électrochimique, aux salissures et aux perturbations électrostatiques présentes dans les capteurs à électrodes.

2. Schéma de principe

Le fonctionnement du système est illustré dans la figure ci-dessous. Le microcontrôleur STM32 génère un signal sinusoïdal de 10 kHz via son DAC. Ce signal est conditionné par un suiveur avant d'exciter la bobine primaire. Le champ magnétique produit traverse le fluide, modifié selon sa conductivité. Le signal reçu par la bobine secondaire est amplifié puis numérisé par l'ADC pour un traitement numérique (FFT) embarqué. Il est ensuite affiché sur un terminal via une liaison UART.

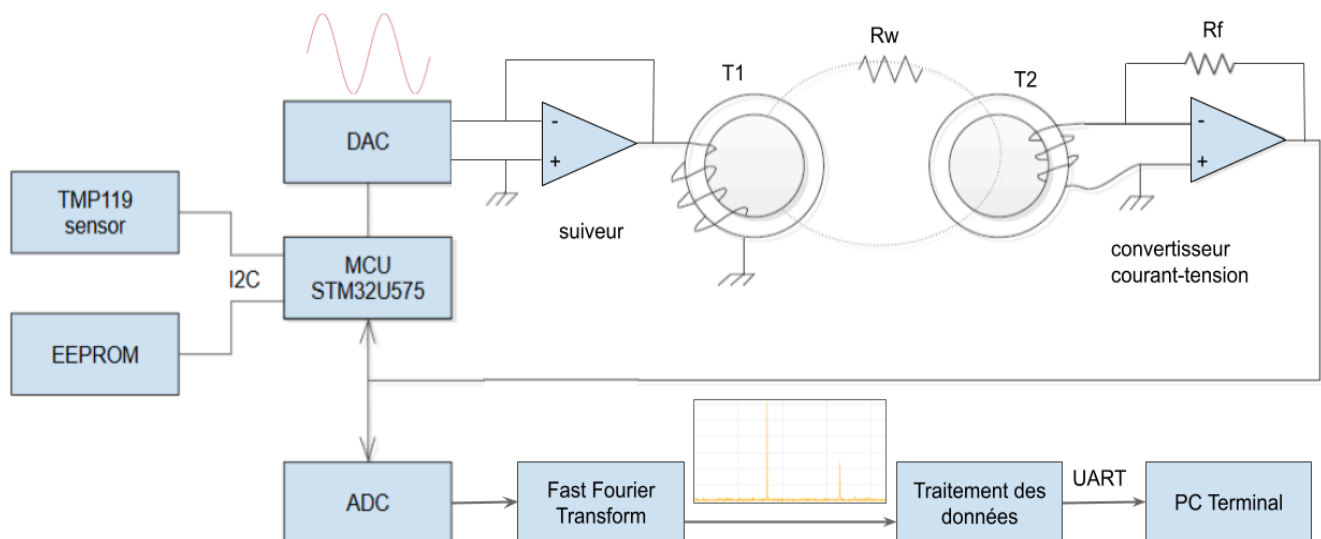


FIGURE 2 : SCHÉMA DU CAPTEUR DE CONDUCTIVITÉ

3. Avantages comparés aux capteurs à électrodes

Les capteurs inductifs présentent plusieurs avantages par rapport aux capteurs à électrodes. Ils éliminent le besoin de contact direct avec le milieu mesuré, réduisant ainsi les risques de biofouling et de corrosion, tout en minimisant la maintenance nécessaire. Ces capteurs sont particulièrement adaptés pour des environnements difficiles, capables de mesurer une large gamme de conductivités même en présence de solides en suspension ou de fluides visqueux. Leur robustesse et leur durabilité sont accrues grâce à l'absence de pièces mobiles ou de composants exposés, ce qui facilite également leur installation et leur nettoyage. De plus, les capteurs inductifs évitent les problèmes de polarisation rencontrés avec les capteurs à électrodes, offrant ainsi des mesures plus stables et fiables. Ces caractéristiques font des capteurs inductifs un choix privilégié pour de nombreuses applications industrielles et environnementales où précision et fiabilité sont essentielles.

En revanche, ils nécessitent une électronique plus complexe, un calibrage rigoureux, et un traitement numérique adapté pour garantir des mesures fiables.

11. Développement du circuit de mesure

1. Génération du signal sinusoïdal

La mesure de conductivité inductive nécessite d'exciter la bobine émettrice avec un signal sinusoïdal stable, de fréquence fixe. Dans notre cas, un signal à 10 kHz, d'une amplitude de 0,5 V crête-à-crête, a été retenu comme fréquence de travail. Ces valeurs ont été choisies en se basant sur des rapports d'études déjà effectués sur le sujet, notamment une étude d'une faculté d'électronique nord-coréenne intitulée "A new design of inductive conductivity sensor for measuring electrolyte concentration in industrial field"

Le microcontrôleur STM32U575 utilisé dans le projet intègre un convertisseur numérique-analogique (DAC) en 12 bits, capable de générer ce type de signal avec une bonne stabilité. Une table de valeurs (représentant une période de sinusoïde) est stockée en mémoire et transférée cycliquement vers le DAC.

Initialement, une implémentation basée sur le DMA (Direct Memory Access) était envisagée pour que le DAC qui fournit la sinusoïde soit complètement autonome et hors de la boucle principale du main. Cette solution permet de transférer automatiquement, et sans intervention du CPU, les valeurs d'une table sinusoïdale

vers le DAC, déclenchées à intervalle régulier par un timer via un signal de déclenchement "TRGO_Event".

Elle offre plusieurs avantages :

- très faible charge processeur
- fréquence de sortie très stable et continue
- génération autonome après initialisation

Cependant, des dysfonctionnements ont été constatés lors de l'utilisation du DMA avec le DAC, empêchant la génération correcte de la sinusoïde. La source du blocage n'a pas pu être clairement identifiée. Cette méthode a donc été abandonnée au profit d'un pilotage manuel et synchrone directement dans la boucle principale du main.

Concrètement, une table contenant 100 échantillons d'une sinusoïde est générée en mémoire lors de l'initialisation du système. Cette sinusoïde est définie avec une amplitude de 0.5 V crête à crête, centrée autour de 1.65V (3.3V/2) afin d'éviter toute saturation basse liée à la tension minimale admissible du DAC (qui ne descend pas exactement à 0 V). Le choix de 100 points permet un bon compromis entre résolution spectrale du signal et simplicité de calcul.

La mise à jour de la sortie du DAC s'effectue ensuite dans la boucle principale, à une fréquence de 1MHz, soit une mise à jour tous les 1 μ s. À chaque fois qu'au moins 1 μ s s'écoule, l'index de la table est incrémenté, et une nouvelle valeur est envoyée au DAC. Ce mécanisme permet de parcourir les 100 points de la table en 100 μ s, ce qui implique logiquement une période égale pour notre sinusoïde et donc une fréquence de 10kHz constante :

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{100 \cdot 10^{-6}} = 10kHz$$

Bien que cette méthode repose sur une gestion explicite dans la boucle principale (et non en interruption ou DMA), elle offre plusieurs avantages :

- un contrôle total sur la génération du signal
- une fréquence stable, grâce à l'horloge matérielle du timer
- une intégration simple dans l'architecture existante

Elle consomme en revanche une part plus importante de temps CPU, ce qui pourrait poser problème dans un système multitâche ou fortement sollicité. Dans notre cas, le système embarqué étant dédié à la génération, l'acquisition et le traitement du signal, ce choix s'est révélé plutôt adapté.

2. Schéma du montage électronique

Le schéma global du système de mesure est représenté à la figure suivante. Il regroupe l'ensemble des blocs fonctionnels : génération du signal, injection dans la bobine, réception, amplification, acquisition, traitement et communication.

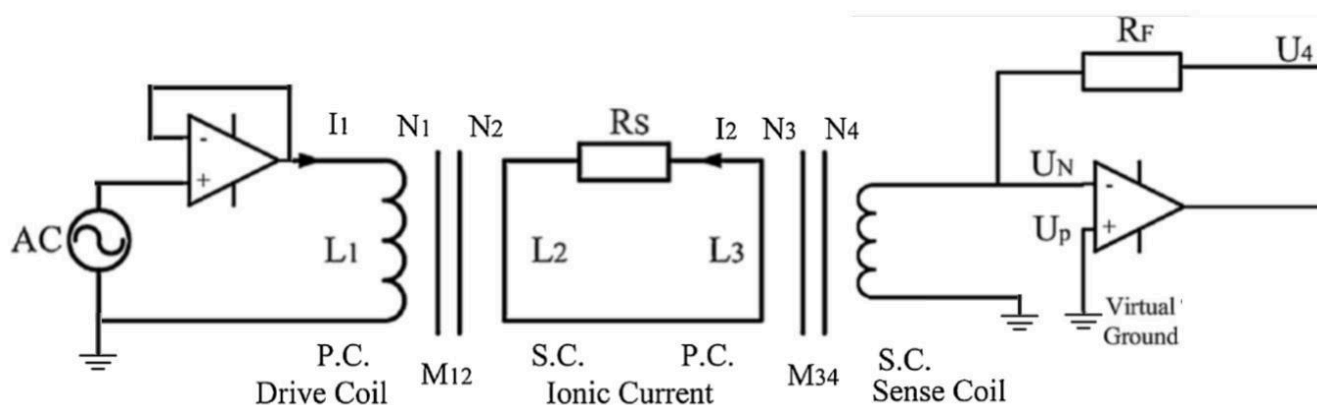


FIGURE 3 : SCHÉMA DU CIRCUIT ÉLECTRONIQUE

Un amplificateur suiveur (montage non-inverseur) est placé entre la sortie du DAC et la bobine émettrice. Son rôle principal est d'isoler le convertisseur numérique-analogique (DAC) du reste du circuit analogique, en particulier de la charge inductive représentée par la bobine.

Cette isolation est essentielle pour garantir la stabilité du signal. En effet, connecter directement une bobine — charge à la fois inductive et faiblement résistive — au DAC risquerait de perturber sa sortie, en modifiant la forme d'onde ou en provoquant des affaissements de tension.

Le suiveur possède une impédance d'entrée très élevée, ce qui signifie qu'il ne prélève pratiquement aucun courant sur la sortie du DAC. En parallèle, il offre une impédance de sortie faible, ce qui lui permet de fournir le courant nécessaire à la bobine sans chute significative de tension.

Il agit ainsi comme un tampon :

- en protégeant le DAC contre une charge trop exigeante.
- et en fournissant à la bobine un signal propre et stable, sans distorsion due à une limitation de courant.

Après avoir traversé le suiveur, le signal sinusoïdal est appliqué à la bobine émettrice. Pour une description complète du principe de couplage inductif entre les deux bobines, se référer à la section "Principe de fonctionnement physique" (page 17). Le signal est ensuite traité par la dernière partie du circuit : un montage convertisseur courant-tension à masse virtuelle, basé sur un amplificateur opérationnel.

Le signal de la bobine réceptrice est directement lié aux courants de Foucault induits dans le fluide conducteur. Ce courant est très faible et doit être converti en tension pour être traité par le microcontrôleur. Pour cela, le circuit utilise un montage à amplificateur opérationnel LM358 en configuration à masse virtuelle (ou "virtual short"). Dans ce type de montage, l'entrée inverseuse est fixée à une tension de référence stable, ici 1,6 V, générée par un pont diviseur de tension. Cela permet de centrer le signal sinusoïdal amplifié autour de cette valeur, de maximiser la dynamique de sortie de l'AOP (3,3 V d'alimentation), et de garantir que le signal reste toujours dans la plage admissible de l'ADC.

La principale propriété de ce montage est que la tension entre les deux entrées de l'amplificateur reste constante : $U^- = U^+ = U_{VG} = 1.6V$. Les bornes de la bobine réceptrice sont donc considérées comme court-circuitées en tension (différence de potentiel négligeable), ce qui implique que toute la tension se retrouve aux bornes de la résistance de rétroaction, et que l'intégralité du courant traverse cette résistance. Ainsi, la tension en sortie est donnée par :

$$V_{OUT} = U_{VG} \pm R_f \cdot I_4$$

Ce montage permet une conversion linéaire et précise du courant en tension, adaptée au traitement numérique.

Ce principe est appuyé par le modèle théorique du capteur décrit dans l'article scientifique *paper_1_DPRK*, où les relations électriques complètes sont établies via les lois de Kirchhoff et la loi d'Ohm. Les équations (4) à (7) décrivent les courants dans les différentes parties du système, intégrant inductances, résistances parasites et couplages mutuels :

$$(4) : I_1 = \frac{A}{A(R_1 + j\omega L_1) + \omega^2 M_{12}^2} U_1 \quad \text{courant dans la bobine primaire } I_1 \text{ en fonction de } U_1$$

$$(5) : I_2 = -\frac{j\omega M_{12}}{A} I_1 \quad \text{courant induit } I_2 \text{ via le couplage } M_{12}$$

(6) : $I_4 = \frac{-j\omega M_{34}}{R_r + R_4 + j\omega L_4} I_2$ courant dans la bobine secondaire I_4 via couplage M_{34}

(7) : $A = \frac{\omega^2 M_{34}^2}{R_r + R_4 + j\omega L_4} + (R_s + j\omega L_2 + j\omega L_3)$ définition de l'impédance A globale du système

Ces équations tiennent compte des pertes magnétiques R_1, R_4 , des inductances L_1, L_4 , et des impédances série de la solution mesurée R_s .

Afin de simplifier ce modèle complexe, l'article pose les hypothèses suivantes :

H9 : $R_1 \ll \omega L_1$ et $R_1 \ll N_1^2 R_s$

H10 : $R_4 \ll \omega L_4$ et $R_4 \ll N_4^2 R_s$

H11 : couplages magnétiques parfaits $k_{12} = k_{34} = 1$

H12 : impédance d'entrée de l'amplificateur négligeable $R_r = 0$

En intégrant ces hypothèses dans les équations précédentes, on néglige les pertes et on considère un transfert de puissance optimal entre les enroulements. On obtient alors une relation simplifiée et linéaire entre la tension d'entrée U_1 , le courant de sortie I_4 , et la conductance de la solution $G = \frac{1}{R_s}$, donnée par l'équation 13 de l'article :

$$I_4 = \frac{U_1}{N_1 N_4} G$$

Cette équation justifie le recours au montage à masse virtuelle : elle garantit que le courant mesuré est directement proportionnel à la conductance, et donc à la salinité, avec une excellente linéarité. L'usage de l'amplificateur en masse virtuelle permet ainsi une exploitation fidèle du principe physique du capteur inductif décrit dans *paper_1_DPRK*.

12. Conception matérielle et intégration

1. Test bobines et validation du circuit sur breadboard

Avant de réaliser le PCB final, une phase de prototypage sur breadboard a été menée afin de valider le fonctionnement du circuit analogique. Cette étape a permis de tester séparément :

- l'implémentation du suiveur
- l'amplification avec suiveur et convertisseur courant-tension
- l'influence de la masse virtuelle
- le comportement des bobines en configuration réelle avec différents milieux.

Un premier PCB a été réalisé uniquement pour supporter les bobines toroïdales. Ce module était connecté par fils aux circuits fait sur breadboard, ce qui a permis de pouvoir faire des tests tout en pouvant modifier librement le circuit.

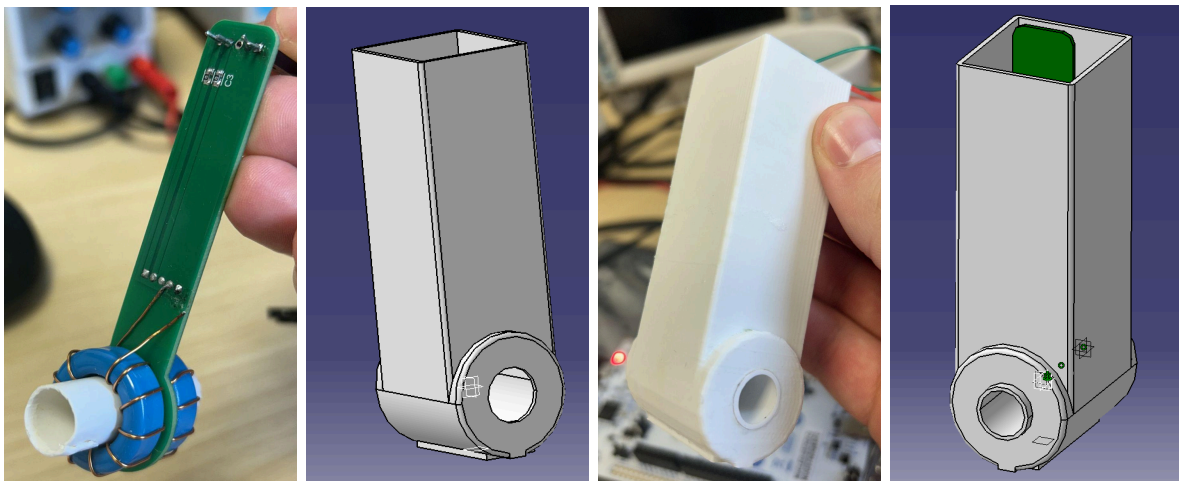


FIGURE 4 : TEST BOBINE ET COQUE CAPTEUR

Après obtention de résultats stables et reproductibles sur cette version, un PCB complet a été conçu et fabriqué, intégrant l'ensemble des composants. L'impression d'une coque adaptée pour le capteur a également permis de garantir l'isolation du circuit vis-à-vis de l'eau (voir FIGURE 4 : TEST BOBINE ET COQUE CAPTEUR) en coulant le PCB dans du silicone une fois parfaitement placé dans ce dernier.

2. Composants intégrés (TMP119, EEPROM)

Le circuit a été intégré sur un PCB double face, conçu sous Autodesk Fusion, intégrant l'ensemble des fonctions nécessaires au capteur : génération et conditionnement du signal, amplification, acquisition, mesure de température, ainsi que connectique pour l'alimentation et les communications.

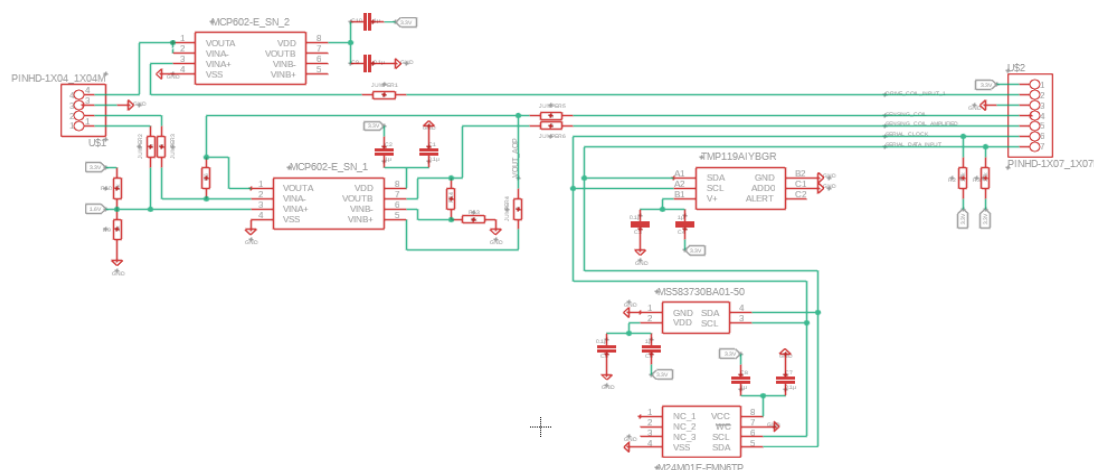


FIGURE 5 : CIRCUIT PCB

Deux composants principaux ont été intégrés en plus de la partie conductivité :

- **TMP119** : capteur de température numérique de haute précision, communicant via I²C. Il possède une contrainte au niveau du choix de placement car il doit être placé au plus près des bobines pour garantir une mesure thermique représentative du fluide traversé, essentielle au calcul de salinité (C@T).
- **EEPROM** : prévue pour une future version. Elle servira à stocker localement les données de calibration, permettant au capteur de conserver ses paramètres d'étalonnage entre chaque redémarrage. Elle pourra également être utilisée pour enregistrer des séries temporelles longues, rendant le capteur autonome sans liaison série permanente.

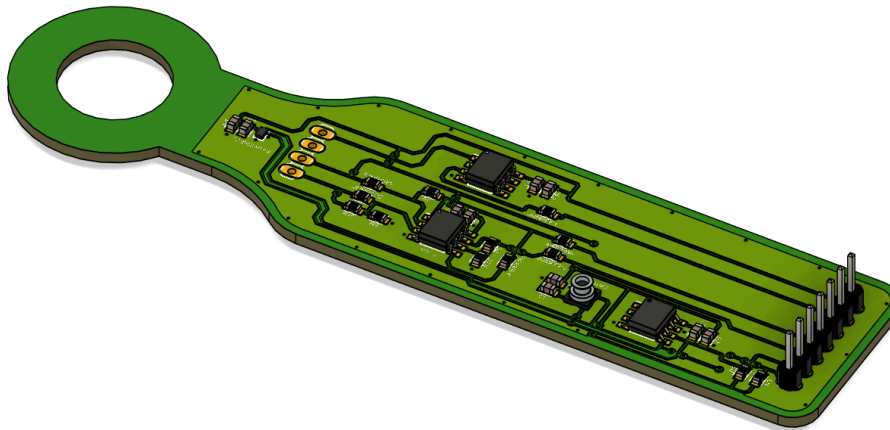


FIGURE 6 : PCB IMPRIMÉ

Un troisième était envisagé au début. Dans le circuit de base, nous voulions intégrer un **MS5837**. Un capteur de pression haute résolution, également sur bus I²C, qui aurait servi pour les tests verticaux en colonne d'eau (0 - 100m). Il aurait été négligeable pour l'utilisation sur la bouée MELODI car immersion à très faible profondeur (0 - 25cm).

Nous pensions qu'il avait un impact non négligeable sur la conductivité, mais après réflexion, nous avons choisi de nous en affranchir. La pression a bel et bien un impact sur la conductivité, de l'ordre de 2.6% à 1700m d'après une étude menée par monsieur Bradshaw "The effect of pressure on the electrical conductance of sea water". Donc en supposant que ce soit linéaire sur 0-1700m, on peut estimer une variation de 0.15% à 100m soit 0.08 mS/cm (à 55 mS/cm qui est la conductivité normale de l'eau de mer). C'est en dessous des 0.15 mS/cm d'exactitude du cahier des charges.

Ce capteur possédait également une contrainte de placement sur notre PCB car il fonctionne selon le principe de déformation d'une membrane interne, en silicium, qui réagit à la pression exercée par le fluide. La pression est mesurée par la variation de tension due à la déformation de cette membrane. Pour que la mesure soit valide, la membrane doit être directement exposée à la pression ambiante du milieu extérieur (eau ou air). Toute barrière ou perturbation devant cette membrane fausserait la mesure ou l'annulerait complètement. Cela impose une contrainte mécanique : le capteur doit être positionné en bord de PCB, dans l'axe d'un passage direct vers l'extérieur, généralement via une ouverture étanche dans le boîtier du capteur. Une autre solution aurait été de développer un second PCB que pour l'intégration de ce seul capteur, un FCP (Flexible Printed Circuit). Ce genre de PCB est conçu pour être flexible et pliable et aurait permis une liberté de placement dans le boîtier du capteur.

13. Acquisition et traitement embarqué

1. Configuration de l'ADC (double canal, fréquence d'échantillonnage)

L'acquisition du signal mesuré est assurée par l'ADC4 du STM32U575, configuré pour échantillonner deux canaux en mode scan :

- **IN4** : tension appliquée à la bobine émettrice (signal de référence),
- **IN10** : tension issue de la bobine réceptrice après amplification (signal mesuré).

Initialement, l'ADC1 devait être utilisé pour l'acquisition du signal, car il offre une résolution de 14 bits (16384 valeurs possibles), bien plus précise que l'ADC4 qui lui fonctionne en 12 bits (4096 valeurs possibles). Cependant, des valeurs incohérentes ont rapidement été constatées : l'ADC1 mesurait 3,0 V à la place de 3,3 V, et 1,4 V à la place de 0 V, indépendamment du canal utilisé ou des tensions appliquées. Le passage en 12 bits a été testé pour vérifier si cela dépendait de la résolution mais les mêmes erreurs ont été retrouvées. Ces valeurs rendant la mesure inutilisable, l'acquisition a été basculée sur l'ADC4, dont les mesures se sont révélées parfaitement fiables.

Le déclenchement de l'ADC est assuré par un signal TRGO émis par le timer TIM2, configuré pour générer un événement à une fréquence globale d'échantillonnage de 61,5 kHz (au plus proche de 60kHz). L'ADC4 est configuré pour fonctionner en mode scan.

Le mode scan permet d'acquérir les deux canaux à chaque déclenchement, alternativement. Ainsi, chaque canal est effectivement échantillonné à 30,75 kHz, ce qui permet de respecter le théorème de Shannon pour un signal utile à 10 kHz, la fréquence d'échantillonnage doit être plus grande que 20kHz au minimum pour respecter Shannon.

L'ADC4 fonctionne en résolution 12 bits et en mode DMA circulaire, ce qui permet de transférer automatiquement les données converties vers la mémoire sans intervention du processeur. Plus haut j'avais déjà présenté le DMA car l'idée de base était de l'utiliser également pour le DAC qui devait fournir la sinusoïde. Lorsqu'un événement TRGO du timer TIM2 est reçu, l'ADC effectue successivement deux conversions : d'abord sur le canal IN4 (tension d'entrée), puis sur le canal IN10 (tension de sortie).

Chaque paire de conversions génère deux valeurs qui sont stockées à la suite dans un tableau unique de 4096 indexs. Les données sont donc intercalées : les échantillons d'entrée et de sortie se succèdent alternativement dans la table `adc4_raw_samples`.

Le DMA est configuré en mode circulaire, ce qui signifie que lorsque la fin du tableau est atteinte, l'écriture recommence depuis le début, sans interruption du flux d'acquisition. Un drapeau de fin de transfert complet est généré par le DMA une fois que les 4096 valeurs sont remplies.

À ce moment-là, une interruption est déclenchée, signalant que les données sont prêtes à être traitées. C'est à ce moment là que l'on sépare nos valeurs dans deux tableaux distincts pour identifier clairement les valeurs en entrée et en sortie de notre capteur, afin d'appliquer la FFT sur chacun d'eux séparément.

```
for (uint16_t i = 0; i < FFT_SAMPLE_SIZE; i++)  
{  
    adc4_in_f32[i] = (float32_t)adc4_raw_samples[2*i]; // IN4 (entrée capteur)  
    adc4_out_f32[i] = (float32_t)adc4_raw_samples[2*i+1]; // IN10 (sortie capteur)  
}
```

FIGURE 7 : SÉPARATION DANS DEUX TABLEAUX DISTINCTS

2. Traitement du signal

Le traitement fréquentiel est effectué directement embarqué, à l'aide de la bibliothèque CMSIS-DSP, optimisée pour les microcontrôleurs ARM Cortex-M.

Une FFT rapide (RFFT) est appliquée sur chaque canal avec la fonction `arm_rfft_fast_f32()`, initialisée une fois au démarrage avec `arm_rfft_fast_init_f32()`. La sortie de chaque transformée contient des paires (réel, imaginaire) pour chaque fréquence. Ces données sont ensuite converties en modules spectraux via la formule :

$$A_k = \sqrt{Re_k^2 + Im_k^2}$$

L'indice $k = 330$ correspond à la composante à 10 kHz, compte tenu des paramètres suivants :

- $N = 2048$ points FFT,
- $F = 61,5$ kHz (soit 30,75 kHz par canal en mode scan),
- $f_k = \frac{k \times F}{N} = \frac{330 \times 61538}{2048} = 9.9 \text{ kHz}$

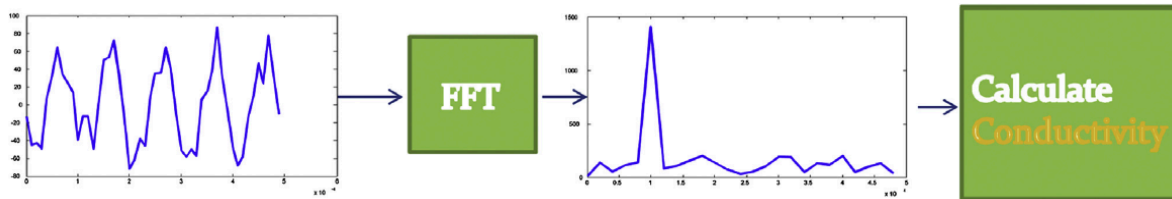


FIGURE 8 : CHAÎNE DU TRAITEMENT DE SIGNAL

L'amplitude extraite du spectre FFT à 10 kHz est convertie en tension crête à crête à l'aide de la fonction `AmplitudeToVoltage()`. Cette fonction prend en entrée l'amplitude spectrale brute `amplitude_fft`, le nombre de points de la FFT, et la tension de référence v_{ref} (3.3 V). La conversion repose sur trois étapes :

1. Normalisation de l'amplitude spectrale :

$$A_k = \frac{2}{N} \cdot A_{FFT}$$

Ce facteur $2/N$ compense l'effet de l'algorithme FFT (FFT réelle symétrique), en ramenant l'amplitude à une échelle représentative du signal d'origine.

2. Conversion en tension :

$$V = \left(\frac{A_k \cdot V_{ref}}{4096} \right)$$

Cette formule permet de convertir l'amplitude spectrale normalisée A_k en tension, en tenant compte de la résolution de l'ADC et de la tension de référence V_{ref} .

3. Passage à la tension crête à crête :

$$V_{cc} = V \times 2$$

Ce facteur 2 est fondamental : il vient du fait qu'une sinusoïde de tension crête à crête A s'écrit mathématiquement $\frac{A}{2} \cdot \sin(\omega t)$. La FFT retourne donc une amplitude de $A/2$, et il faut multiplier par 2 pour retrouver la tension crête à crête du signal original.

Cette chaîne de transformation permet donc de relier de manière rigoureuse l'amplitude spectrale à la tension crête à crête mesurée, utilisée ensuite dans le calcul de la conductivité.

14. Calibration et calcul de la conductivité

1. Solutions utilisées pour la calibration

La calibration du capteur a été effectuée à l'aide de deux solutions de conductivité connues, couvrant une plage représentative de conductivité. Normalement, j'aurais dû aller dans les locaux de l'IUEM pour effectuer les calibrations dans des bains où l'on contrôlait la température à 25°C constante et où l'on mesurait avec un vrai conductimètre (de plusieurs milliers d'euros). La configuration du microcontrôleur ayant pris plus de temps que prévu, une calibration complète du capteur n'a donc pas pu être réalisée. Une calibration primaire a été effectuée à partir de deux solutions étalonnées fournies par l'équipe de l'IUEM, complétée par une mesure sur de l'eau du robinet. :

- Eau du robinet (Plouzané) : conductivité approximative estimée à 0,4–0,8 mS/cm
- Solution d'eau de mer diluée à 17,8 PSU : conductivité mesurée $\approx 28,9$ mS/cm ($\pm 5\%$)
- Solution d'eau de mer diluée à 35,2 PSU : conductivité mesurée $\approx 53,5$ mS/cm ($\pm 5\%$)

2. Conversion en conductivité, calibration

La première approche développée pour caractériser le capteur visait à retrouver une chaîne complète de mesure physique : génération d'un signal sinusoïdal connu via le DAC, mesure du signal récepteur par l'ADC, extraction du pic via une FFT embarquée, puis conversion rigoureuse de ce pic en tension crête à crête à l'aide des paramètres système (résolution ADC, tension de référence, normalisation FFT). Cette tension permettait ensuite de remonter analytiquement jusqu'à la conductivité de la solution, en s'appuyant sur le modèle inductif développé (équation 13 du paper_1_DPRK) et les caractéristiques géométriques du capteur :

$$\sigma = \frac{I_4 \cdot N_1 \cdot N_4}{U_1} \times \frac{L}{S}$$

Cette méthode, fondée sur un schéma électrique précis et des relations physiques (loi d'Ohm, loi de Kirchhoff, couplage inductif), visait une traçabilité complète de la mesure. Elle a permis d'identifier plusieurs phénomènes inattendus : influence des bobines, filtrage passif du signal par le circuit, non-linéarités résiduelles sur certaines plages de fréquence, et sensibilité accrue aux parasites à faible amplitude. Ces limites ont été analysées, mais elles rendaient le modèle difficile à exploiter de façon stable dans un contexte embarqué.

En conséquence, d'un point de vue ingénieur pour qui le but est de pas perdre son temps et d'avoir quelque chose qui fonctionne, sans forcément avoir besoin de savoir en profondeur pourquoi (même si l'idéal est toujours de comprendre le fonctionnement de ce que l'on conçoit), une seconde méthode plus simple a été testée : une calibration empirique par régression polynomiale à partir de solutions de conductivité connues. Cette approche consiste à établir une relation directe entre la valeur brute du pic FFT à 10 kHz et la conductivité mesurée σ , sans passer par la chaîne de conversion physique complète.

Par exemple :

- $\sim 3500 \rightarrow 28,9$ mS/cm (solution à 17,8 PSU)
- $\sim 9500 \rightarrow 53,5$ mS/cm (solution à 35,2 PSU)
- et un point bas correspondant à l'eau du robinet (valeur plus faible, typiquement entre 60 et 100 FFT, conductivité estimée entre 0,4 et 0,6 mS/cm)

À partir de ces valeurs, une loi polynômiale de degré 2 a été ajustée :

$$\sigma(A) = aA^2 + bA + c$$

où A est l'amplitude brute FFT à 10 kHz, et σ la conductivité correspondante. Les coefficients a , b , et c ont été déterminés par régression quadratique sur les données de calibration.

Cette méthode, bien qu'elle transforme le capteur en une "boîte noire", ce qui se traduit par l'absence de traçabilité physique, présente un avantage immédiat en contexte applicatif : rapidité de mise en œuvre, simplicité du traitement embarqué, et résultats exploitables sans recalculs complexes.

Ainsi, la calibration empirique ne remplace pas l'analyse physique, mais s'inscrit dans une démarche complémentaire, adaptée aux contraintes d'un développement de prototype. Elle reste limitée en généralisation (dépendance à la géométrie, à l'environnement, etc.), mais constitue une solution efficace et justifiée dans un cadre de développement rapide.

15. Tests expérimentaux

1. Présentation des résultats

Les tests ont été réalisés sur plusieurs solutions de conductivité connues (28.9 mS/cm, 53.5 mS/cm), en suivant un protocole reproductible : génération sinusoïdale à 10 kHz, acquisition par ADC4 (30 kHz, double canal), FFT embarquée, extraction du pic à 10 kHz, et conversion en tensions crête à crête puis en conductivité.

Les figures ci-dessous illustrent les résultats typiques :

Tout d'abord les spectre FFT : pic net à 10 kHz, avec une amplitude croissante selon la conductivité de la solution.

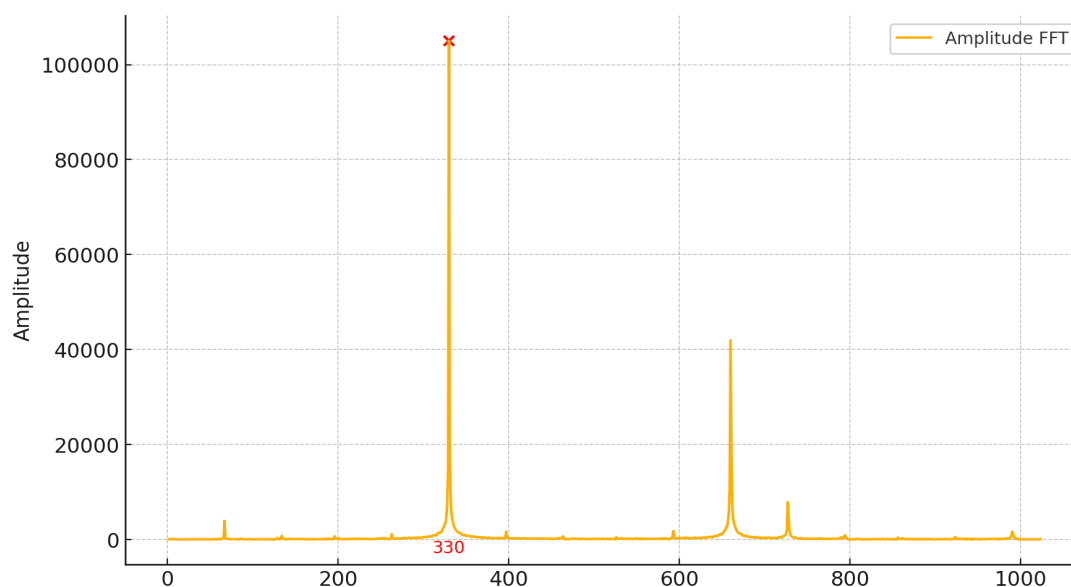


FIGURE 9 : FFT SUR SIGNAL ENTRÉE CAPTEUR

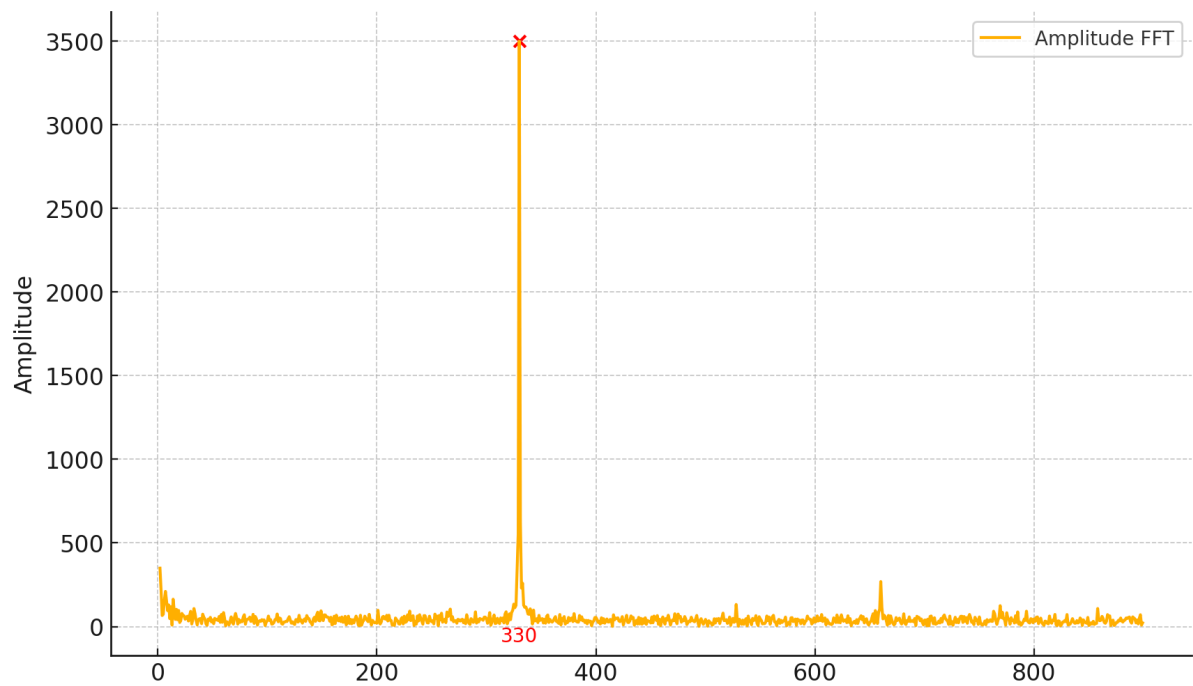


FIGURE 10 : FFT - SORTIE CAPTEUR, SOLUTION 28.9mS/cm

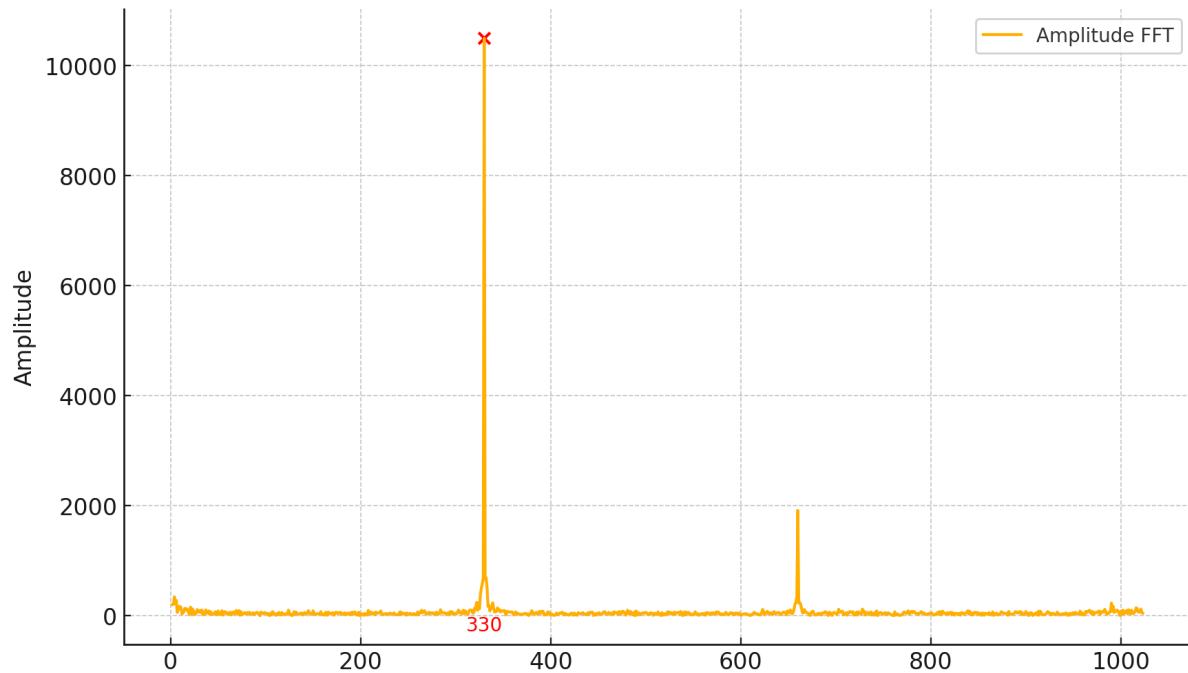


FIGURE 11 : FFT - SORTIE CAPTEUR, SOLUTION 53.5mS/cm

Les trois graphes présentés ci-dessus représentent l'amplitude des composantes fréquentielles obtenues par transformée de Fourier rapide (FFT) à partir des signaux mesurés en entrée et en sortie du capteur de conductivité inductif.

- Le premier graphe (figure 9) montre le spectre de l'entrée du capteur, c'est-à-dire le signal sinusoïdal injecté à 10 kHz. On y observe un pic d'amplitude très marqué à l'indice 330, correspondant à la fréquence de 10 kHz, confirmant la stabilité et la pureté du signal d'excitation.
- Le deuxième graphe (figure 10) représente le spectre de sortie lorsque le capteur est plongé dans une solution de conductivité 28.9 mS/cm. Le pic est également situé à l'indice 330, mais avec une amplitude significativement plus faible que celle du signal d'entrée, traduisant une atténuation liée à l'interaction du champ électromagnétique avec la conductivité du milieu.
- Le troisième graphe (figure 11) illustre la sortie du capteur dans une solution plus concentrée (53.5 mS/cm). On observe à nouveau un pic à l'indice 330, avec une amplitude supérieure à celle mesurée dans la solution à 28.9 mS/cm, ce qui confirme la sensibilité du capteur aux variations de conductivité.

Ces résultats confirment que le pic spectral à 10 kHz (indice 330) est bien présent en entrée comme en sortie, et que la variation de son amplitude en sortie permet de quantifier la conductivité du milieu environnant.

Ensuite, la tension crête à crête mesurée sur U1 et U4 en mV avec U1 l'amplitude de la sinusoïde envoyée au circuit et U4 l'amplitude de la sinusoïde en sortie du circuit, proportionnelle à la conductivité de la solution

U1 = 326.2139 mV	U4 = 13.7226 mV	U1 = 336.1357 mV	U4 = 33.0009 mV
U1 = 344.7729 mV	U4 = 13.8938 mV	U1 = 344.0282 mV	U4 = 33.5942 mV
U1 = 322.4903 mV	U4 = 12.5459 mV	U1 = 328.9062 mV	U4 = 31.2505 mV
U1 = 340.5487 mV	U4 = 13.6312 mV	U1 = 344.5905 mV	U4 = 33.8534 mV
U1 = 321.5094 mV	U4 = 13.3344 mV	U1 = 335.4710 mV	U4 = 32.3592 mV
U1 = 343.5774 mV	U4 = 14.0067 mV	U1 = 344.9532 mV	U4 = 32.2384 mV
U1 = 331.6360 mV	U4 = 13.3617 mV	U1 = 334.7066 mV	U4 = 32.5265 mV
U1 = 346.5307 mV	U4 = 14.4053 mV	U1 = 348.5986 mV	U4 = 33.6419 mV
U1 = 337.4550 mV	U4 = 13.5809 mV	U1 = 342.8641 mV	U4 = 31.3840 mV
U1 = 345.8057 mV	U4 = 13.6749 mV	U1 = 348.9639 mV	U4 = 32.8027 mV
U1 = 331.3969 mV	U4 = 13.0674 mV	U1 = 337.4887 mV	U4 = 31.6113 mV
U1 = 343.1250 mV	U4 = 13.5778 mV	U1 = 347.1588 mV	U4 = 32.0354 mV
U1 = 333.2082 mV	U4 = 12.4565 mV	U1 = 341.2697 mV	U4 = 31.8634 mV
U1 = 335.5995 mV	U4 = 12.9891 mV	U1 = 345.4704 mV	U4 = 31.6904 mV

FIGURE 12 : AMPLITUDE CRÊTE À CRÊTE SIGNAUX DANS 28.9mS/cm et 53.5mS/cm

Les deux captures d'écran affichent les amplitudes crête-à-crête mesurées pour les signaux sinusoïdaux en entrée (U1) et en sortie (U4) du capteur de conductivité, dans deux milieux aqueux de conductivités différentes.

- Dans le premier cas (screenshot de gauche), les valeurs de U1 oscillent autour de 330–346 mV, ce qui correspond à la tension injectée par le DAC. Les tensions mesurées en U4 sont faibles, typiquement autour de 13–14 mV, ce qui montre une atténuation importante du signal après interaction avec la solution de 28.9 mS/cm.
- Dans le second cas (screenshot de droite), les valeurs de U1 restent similaires, ce qui prouve la stabilité de la sinusoïde d'entrée. En revanche, les valeurs de U4 augmentent significativement, atteignant typiquement 31–34 mV. Cette augmentation est cohérente avec une conductivité plus élevée (53.5 mS/cm), qui induit une plus grande interaction inductive entre les bobines du capteur.

Ces mesures montrent que l'amplitude de la tension en sortie (U4) est directement influencée par la conductivité du milieu, ce qui valide le fonctionnement du capteur et sa capacité à discriminer différents niveaux de salinité à partir de la réponse sinusoïdale.

Et enfin, la conductivité estimée : valeurs proches des références pour les solutions à 28,9 mS/cm et 53,5 mS/cm, après ajustement du modèle.

Conductivite = 29.027 mS/cm	Conductivite = 78.205 mS/cm
Conductivite = 29.040 mS/cm	Conductivite = 77.933 mS/cm
Conductivite = 28.339 mS/cm	Conductivite = 77.656 mS/cm
Conductivite = 28.758 mS/cm	Conductivite = 78.726 mS/cm
Conductivite = 28.596 mS/cm	Conductivite = 78.833 mS/cm
Conductivite = 29.471 mS/cm	Conductivite = 78.324 mS/cm
Conductivite = 29.156 mS/cm	Conductivite = 77.365 mS/cm
Conductivite = 29.455 mS/cm	Conductivite = 77.686 mS/cm
Conductivite = 29.225 mS/cm	Conductivite = 77.717 mS/cm
Conductivite = 29.080 mS/cm	Conductivite = 77.819 mS/cm
Conductivite = 29.077 mS/cm	Conductivite = 77.678 mS/cm

FIGURE 13 : VALEURS MESURÉ DANS 28.9mS/cm et 53.5mS/cm

Les deux images montrent les valeurs de conductivité calculées en temps réel à partir des mesures du capteur, en utilisant une formule de calibration basée sur les tension U1 et U4 mesurée via les amplitudes de FFT.

- Pour la solution de 28.9 mS/cm (screenshot de gauche), les résultats sont cohérents et stables : les valeurs calculées oscillent autour de 29 mS/cm avec

une faible dispersion (± 0.5 mS/cm). Cela confirme que la calibration effectuée est fiable pour ce niveau de conductivité, et que le capteur restitue des mesures précises et reproductibles.

- En revanche, dans la solution de 53.5 mS/cm (screenshot de droite), les valeurs estimées dépassent largement la réalité, avec des mesures situées autour de 77–78 mS/cm. Cette surestimation importante indique que le modèle de calibration n'est plus valide pour des conductivités élevées. Cela suggère un comportement non linéaire du capteur au-delà d'un certain seuil.

En résumé, la calibration actuelle donne de bons résultats pour les faibles conductivités, mais devient inexacte pour les milieux plus conducteurs. N'ayant eu que deux solutions étalonnées pour tester, c'est l'hypothèse émise. A vérifier dans plusieurs autres solutions si cette hypothèse se vérifie ou si la méthodologie employée est à corriger.

2. Condition de tests

Les mesures ont été réalisées dans des béciers en plastique, le capteur étant :

- partiellement immergé dans un liquide statique dans un premier temps
- puis soumis à une légère agitation manuelle pour observer l'effet des turbulences.

Les solutions utilisées étaient étalonnées pour une température de 25 °C, mais les tests ont été effectués à température ambiante (environ 20°), ce qui peut expliquer une partie des écarts observés par rapport aux valeurs théoriques.

Les solutions testées ont été laissées au repos avant chaque série de mesures afin de stabiliser les conditions thermiques et mécaniques. Des essais complémentaires ont montré que l'agitation du capteur dans la solution entraîne une augmentation de la conductivité mesurée de l'ordre de 2 à 4 mS/cm, probablement due à une meilleure homogénéisation locale et à la réduction des effets de couche limite.

3. Évaluation des performances

Précision : après calibration via la formule physique ajustée, les écarts sur la solution de référence à 28,9 mS/cm sont restés inférieurs à ± 5 %, ce qui est satisfaisant compte tenu du bruit et des conditions expérimentales. Toutefois, pour la solution à 53,5 mS/cm, les valeurs mesurées s'écartent fortement de la référence (77–78 mS/cm mesurés), indiquant une surestimation importante. Ce biais peut

s'expliquer en partie par une calibration non linéaire au-delà d'un certain seuil, mais aussi par le fait que les solutions utilisées sont étalonnées pour 25 °C, alors que les tests ont été réalisés à température ambiante (environ 20 °C), ce qui impacte directement la conductivité.

Stabilité : sur une série de 10 cycles d'acquisition dans la même solution, la conductivité mesurée varie de moins de 1 mS/cm, traduisant une bonne stabilité et une faible dispersion malgré l'absence de régulation thermique. Néanmoins, cela est insuffisant pour se permettre d'exploiter ces valeurs avec confiance

Temps de réponse : l'ensemble du processus (acquisition, FFT, calcul) est réalisé en moins de 100 ms, ce qui rend le système compatible avec des mesures en quasi-temps réel (jusqu'à 10 Hz en continu). Cela peut être adapté en réduisant le temps de calibration de la sinusoïde et les "HAL_Delay" qui sont présents pour ne pas trop surcharger le processeur

Limites observées :

- Influence de la température : les écarts par rapport aux valeurs étalonnées à 25 °C montrent que la température doit impérativement être prise en compte.
- Effets de couche limite : en condition statique, une sous-estimation peut apparaître. Des tests ont montré qu'une agitation manuelle du capteur dans la solution induit une augmentation de la conductivité mesurée de 2 à 4 mS/cm, en lien avec la suppression partielle de la couche limite.
- Dépendance forte à la calibration : les paramètres géométriques (L et S) et l'ajustement de la formule influencent directement l'exactitude.

Ces points devront être intégrés dans la suite du développement, en particulier pour une application embarquée en environnement marin, où température, mouvement sont des facteurs dominants.

16. Limites et problèmes rencontrés

1. Problème d'ADC1, lecture incorrecte

Le canal ADC1 du STM32U575 s'est révélé inutilisable : malgré une configuration correcte, il mesurait des tensions très éloignées de la réalité (ex : 3.3 V mesuré à 3 V, 0 V mesuré à ~1.4 V). Après vérifications croisées, ce comportement a été attribué à un défaut matériel sur la carte de développement utilisée. Ce problème a conduit à basculer l'acquisition sur l'ADC4, fonctionnel, bien que limité à une résolution de 12 bits au lieu des 14 bits offerts par l'ADC1.

2. Problème de génération de la sinusoïde via le DAC+DMA

La génération de la sinusoïde de 10 kHz, initialement prévue en utilisant le DMA couplé au DAC et au timer TIM15, a posé de nombreuses difficultés. Pendant près d'une semaine, de multiples tentatives ont été réalisées pour faire fonctionner cette configuration, en s'appuyant sur :

- des tutoriels YouTube (STM32 + DAC + DMA)
- des exemples GitHub
- des forums techniques (ST Community, StackOverflow)
- la documentation officielle STM32 et CubeIDE

Malgré une configuration a priori correcte (buffer DMA vers DAC, déclenchement via TRGO sur TIM15), le signal restait figé à une tension basse (~50 mV). Après analyse, le problème viendrait apparemment du fait que le DAC utilisait l'horloge LSI (32 kHz), insuffisante pour une conversion rapide synchrone avec le timer. C'est l'hypothèse qui a été retenue malgré la faible connaissance de la fonctionnalité DMA. Même en changeant les configurations de déclenchement, le DAC n'agissait pas comme attendu.

La décision pour la génération de la sinusoïde a été l'abandon du DMA, jugé trop capricieux et peu transparent dans ce contexte. À la place, la génération du signal a été réécrite entièrement dans la boucle principale (`while(1)`), en lisant le timer TIM15 toutes les 1 μ s pour incrémenter l'indice d'une table de 100 points de sinusoïde (0,5 V crête à crête, centrée sur 0,3 V). Ce fonctionnement simple, bien que plus coûteux en CPU, s'est révélé fiable, stable et parfaitement contrôlable.

Ce problème illustre la complexité réelle de certaines fonctionnalités en apparence "simples" comme le DMA, et montre que la solution la plus efficace n'est pas toujours la plus sophistiquée.

3. Comportement non conforme du montage convertisseur courant-tension

Le montage convertisseur courant-tension basé sur un AOP avec masse virtuelle et résistance de rétroaction R_f s'est montré instable et peu conforme au modèle théorique utilisé pour le calcul de conductivité.

En théorie, la tension mesurée U_4 devrait dépendre linéairement du courant induit dans la bobine secondaire, selon $U_4 = I_4 \cdot R_f$, avec le courant I_4 qui est proportionnel à la conductivité σ .

Or, en pratique :

- Lorsqu'on utilise une valeur élevée de R_f (ex : 500 k Ω), on obtient une tension U_4 centrée sur environ 2,2 V, mais la conductivité calculée via la formule devient très faible, ce qui est incohérent
- À l'inverse, avec une valeur faible de R_f (ex : 30 Ω), U_4 se centre autour de 1,8 V, et les résultats obtenus via la formule sont beaucoup plus cohérents avec les valeurs de référence (PSU/σ)
- Fait étrange : l'amplitude réelle de la sinusoïde en sortie (U_4) reste quasiment inchangée, quel que soit R_f , ce qui ne correspond pas au comportement attendu d'un montage en transimpédance

Ce comportement indique probablement que le montage AOP ne se comporte pas comme un convertisseur idéal, à cause de :

- limitations dynamiques de l'AOP (courant de sortie, bande passante)
- couplage capacitif parasite ou charge réactive non modélisée
- déphasage ou auto-oscillation selon la valeur de R_f
- ou simplement un fonctionnement hors du régime linéaire dans certaines configurations

En conséquence, la relation $U_4 = I_4 \cdot R_f$ ne peut pas être utilisée de façon rigoureuse dans le modèle de calcul de la conductivité sans valider expérimentalement chaque configuration, ou sans adapter dynamiquement la calibration en fonction de la résistance choisie.

4. Limites de la calibration physique par formule analytique

Bien que plus rigoureuse théoriquement, la méthode de calibration fondée sur la formule physique de calcul de la conductivité a montré des écarts importants en pratique. Lorsque la formule est appliquée directement avec les valeurs mesurées (U_1 , U_4) et les paramètres géométriques connus (distance entre les bobines, section du tube, nombre de spires, résistance), les résultats obtenus sont incohérents : par exemple, une solution standard à 53,5 mS/cm est estimée à plus de 70 mS/cm, tandis que celle à 28,9 mS/cm est correctement calibrée à condition d'ajuster les coefficients.

Ce comportement suggère que :

- Le modèle analytique, bien que fondé sur des lois physiques, ne capture pas toutes les pertes réelles (fuites de champ, pertes dans le liquide, couplage imparfait),
- Les paramètres géométriques utilisés (longueur L , section S) sont difficiles à mesurer précisément ou sont effectivement différents de la valeur théorique (par exemple, le champ ne traverse pas uniformément toute la section),
- Certaines constantes ou hypothèses idéalisent trop le système (distribution homogène du champ, absence de parasites, etc.).

5. Problème de comportement inattendu du nouvel amplificateur opérationnel (MCP602)

Lors du passage du prototype sur plaque d'essai au circuit imprimé final, un amplificateur opérationnel MCP602 a été choisi à la place du LM358 utilisé initialement. Ce choix se justifiait par les caractéristiques du MCP602 :

- Rail-to-rail en entrée et en sortie
- Bruit plus faible
- Courant de polarisation plus bas

Cependant, les mesures réalisées sur le PCB avec le MCP602 ont montré un comportement inattendu : le signal en sortie du montage convertisseur courant-tension était moins stable, et sa forme était altérée, avec des pics transitoires et une tendance triangulaire peu compatible avec un signal sinusoïdal pur.

À l'inverse, le LM358 utilisé en prototype (malgré l'absence de rail-to-rail) fournissait un signal plus propre, plus sinusoïdal et mieux centré autour de la masse virtuelle. Ce paradoxe s'explique probablement par :

- une bande passante insuffisante du MCP602 dans les conditions réelles de charge inductive,
- une stabilité inférieure du MCP602 dans le montage masse virtuelle en présence de perturbations haute fréquence,
- un comportement non linéaire en haute impédance qui n'avait pas été anticipé.

Ce retour d'expérience souligne que le choix d'un AOP ne se limite pas aux fiches techniques, et qu'une validation expérimentale reste indispensable, surtout dans un contexte de signaux faibles et de composants réactifs (bobines).

17. Perspectives futures

1. Intégration à la bouée MELODI

Le capteur a été conçu dès l'origine pour une intégration dans la bouée dérivante MELODI, développée par eOdyn. Plusieurs adaptations mécaniques et électroniques sont envisagées à court terme pour cette intégration :

- Structure mécanique : le boîtier du capteur devra garantir l'étanchéité totale, tout en maintenant le capteur de température au plus proche des bobines, à voir si le capteur de température intégré dans la bouée MELODI peut faire l'affaire ou si il faut effectivement utiliser un second embarqué par le capteur de conductivité
- Alimentation : la carte actuelle est alimentée en 3,3 V via une liaison filaire. L'intégration en bouée nécessitera une autonomie énergétique via une batterie Li-ion rechargeable par un panneau solaire
- Transmission des données : actuellement en liaison série UART, le système devra être adapté pour transmettre les données à distance, via un module LoRa, 4G ou satellite, déjà utilisé dans la bouée

2. Extension mémoire EEPROM

La version actuelle du capteur fonctionne en temps réel avec envoi direct des données. Bien qu'une mémoire EEPROM est intégrée sur le PCB, le temps n'as pas été trouvé pour la configurer. Une évolution future prévoit l'ajout d'une EEPROM externe, destinée à :

- de stocker des séries temporelles (U_1 , U_4 , température, salinité)
- stocker les paramètres de calibration pour garantir la fiabilité des mesures après redémarrage
- de fonctionner sans liaison de transmission active en continu

Cela rend le capteur utilisable dans des contextes isolés ou immergés, sans infrastructure de communication constante.

3. Validation terrain avec l'IUEM / campagnes futures

Une phase de test en conditions réelles est prévue en collaboration avec l'IUEM, via l'intégration du capteur sur une sonde CTD OSO. Cela permettra :

- de valider le capteur en profondeur
- de comparer ses mesures à des instruments de référence
- et de tester la robustesse du système dans un environnement marin contraignant (variation de température, salinité, agitation, fouling...)

D'autres campagnes de tests à bord de la bouée MELODI sont également envisagées à l'issue de la phase d'intégration mécanique et d'autonomie.

18. Conclusion

Ce stage a été l'occasion de conduire un projet complet, de la phase de conception à la validation expérimentale, autour d'un capteur de conductivité inductif destiné à l'environnement marin. Le travail a permis de couvrir un large spectre de compétences, allant de l'électronique analogique à l'implémentation embarquée et la configuration du microprocesseur, en passant par la calibration physique et le traitement fréquentiel.

1. Bilan technique

D'un point de vue technique, le développement du capteur a nécessité :

- la conception d'un circuit analogique fiable, incluant des éléments initialement inconnus comme un convertisseur courant-tension à masse virtuelle
- la mise en œuvre d'un traitement numérique embarqué, notamment une FFT temps réel sur microcontrôleur pour extraire des composantes spectrales pertinentes
- une calibration précise du système basée sur un modèle physique traçable, incluant les paramètres géométriques réels du montage

- l'intégration de capteurs complémentaires (température) et la préparation à un fonctionnement autonome (stockage local)

Ces compétences sont directement transposables à d'autres projets impliquant des capteurs intelligents, des systèmes embarqués ou des dispositifs d'instrumentation scientifique.

2. Bilan humain et organisationnel

Ce stage s'est déroulé en totale autonomie, ce qui m'a amené à prendre seul des décisions techniques, à gérer mon temps, à identifier les priorités et à résoudre les problèmes sans encadrement direct au quotidien. Cela m'a permis de développer ma rigueur, mon esprit critique, et ma capacité d'adaptation face aux imprévus techniques (problèmes d'ADC, bruit, composants défectueux...). Cependant, cette autonomie poussée m'a également confirmé que je préfère travailler dans un cadre collaboratif, où les échanges, le partage des idées et les dynamiques d'équipe jouent un rôle moteur dans la progression d'un projet. À l'avenir, je chercherai à m'impliquer dans des projets menés en équipe, où les responsabilités sont partagées, et où les compétences se complètent.

3. Bilan personnel

Ce stage a renforcé mon intérêt pour les systèmes embarqués et l'instrumentation physique appliquée aux milieux naturels. Le lien direct avec l'environnement marin, la possibilité d'intégrer un capteur dans une bouée océanographique, et la perspective de campagnes de mesure m'ont particulièrement motivé. Cela rejoint mes perspectives professionnelles, qui s'orientent vers des applications technologiques en lien avec l'océan ou le littoral. Travailler sur un capteur réellement destiné à être déployé dans ces environnements m'a permis de donner un sens concret aux notions théoriques apprises en formation, et a confirmé mon intérêt pour ce domaine.

19. Bibliographie / Webographie

Pham, T., Green, T., Chen, Y., Truong, P., Vaidya, A., & Bushnell, L. (2009). *A Low-Cost, Data-Logging Salinity Sensor System*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4(4), 381–393. [10.3934/nhm.2009.4.381](https://doi.org/10.3934/nhm.2009.4.381)

Unknown Author. *Cours sur la mesure de la conductivité et principes d'électrochimie appliqués*. Document interne, format PDF. (fichier : cours.pdf)

Unknown Author. *Mesure inductive sur noyaux ferrite – Propriétés et modélisation*. Document interne, format PDF. (fichier : ferrite_r_22_1_13_7_12_5.pdf)

Dankert, R. et al. (1985). *Induktive Leitfähigkeitsmessung für die ozeanologische Anwendung*. DDR Forschungsbericht. (fichier : new_paper_DDR.pdf)

Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2010). *Design and Development of a Contact-less Conductivity Sensor for Oceanographic Applications*. *Proceedings of OCEANS 2010 IEEE – Sydney*. DOI: 0.1109/OCEANSSYD.2010.5664602

Ahn, S., Kim, J., Lee, S., & Oh, T. (2019). *A new design of inductive conductivity sensor for measuring electrolyte concentration in industrial field*. *Sensors and Actuators A: Physical*. (fichier : paper_1_DPRK.pdf)

Parra, L., Sendra, S., Lloret, J., & Bosch, I. (2015). *Design and Development of a Conductivity Sensor for Salinity Monitoring in Aquifers*. *Sensors*, 15, 20990–21012. [doi:10.3390/s150920990](https://doi.org/10.3390/s150920990) (fichier : sensors-15-20990.pdf)

Unknown Author. *Principe de fonctionnement et modélisation des capteurs inductifs dans l'environnement marin*. Document interne. (fichier : paper_DE_1.pdf)

Unknown Author. *Notes techniques sur les contraintes de conception des capteurs en environnement hostile*. Document interne. (fichier : paper_DE_2.pdf)

Unknown Author. *Présentation générale des phénomènes d'induction et de couplage magnétique appliqués aux capteurs*. Document interne. (fichier : P_2621.pdf)

Baumer. *Le fonctionnement et la technologie des capteurs de conductivité*.
URL :

https://www.baumer.com/fr/fr/service-assistance/fonctionnement/le-fonctionnement-et-la-technologie-des-capteurs-de-conductivite-/a/Know-how_Function_conductivity-sensors

Tournier, G. (1965). *Impedance of Inductive Conductivity Cells*. Electrochimica Acta, Volume 10, Issue 4, pp. 423–431.

URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0011747165900215>

IFM Electronic. *Technologie des capteurs de conductivité inductifs*.

URL : <https://www.ifm.com/fr/fr/shared/produits/leitfahigkeit/technologie#inductive>

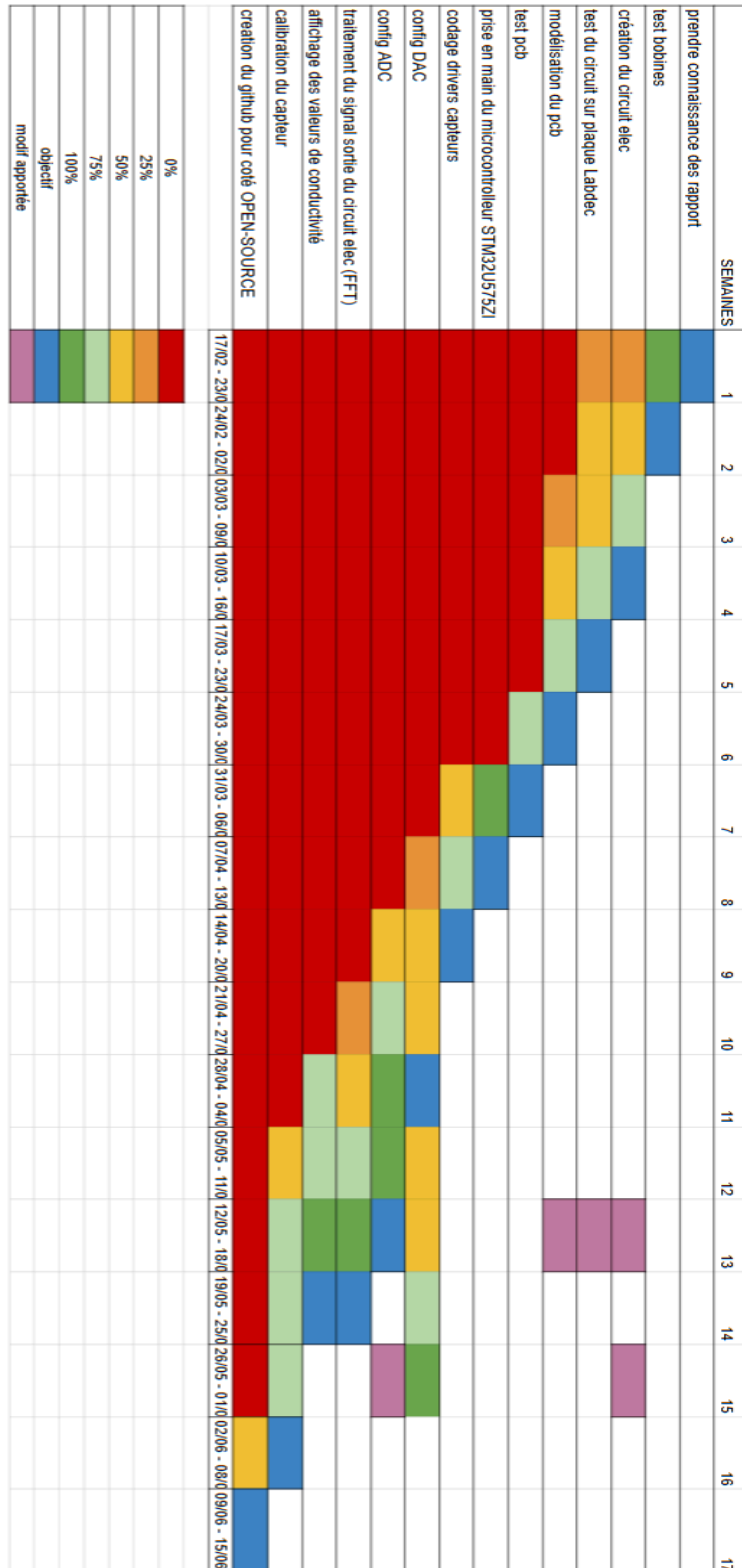
DIY Oceanography BZH 0.0 Documentation, Salinity / Conductivity

URL :

<https://diy-oceanography-bzh.readthedocs.io/en/latest/conductivity/conductivity.html>

20. Annexes

Annexe 1 : GANTT



Annexe 2 – Boucle principale du programme embarqué (main.c)

```

while (1)
{
    // Phase 0 : Génération de la table sinusoïdale (100 points 0.5 Vpp, centrée sur 0.3 V)
    GenerateSineTable();

    // Démarrage du DAC (canal 1) et du timer TIM15 pour le comptage en µs
    HAL_DAC_Start(&hdac1, DAC_CHANNEL_1);
    HAL_TIM_Base_Start(&htim15);

    // Initialisation des compteurs pour gérer la cadence de mise à jour du DAC
    uint32_t start_tick = HAL_GetTick(); // Temps initial (en ms)
    uint32_t last_tick = __HAL_TIM_GET_COUNTER(&htim15); // Valeur de départ du timer TIM15
    uint16_t i = 0; // Index dans le tableau de la sinusoïde

    // Phase 0 : Initialiser la sinusoïde pendant 200 ms (≈ 2000 périodes à 10 kHz) pour calibration
    while ((HAL_GetTick() - start_tick) < 500)
    {
        uint32_t now = __HAL_TIM_GET_COUNTER(&htim15); // Lecture courante du timer
        if ((now - last_tick) >= 1) // Avancer d'1 µs
        {
            last_tick = now;

            // Envoi valeur sinusoïde
            HAL_DAC_SetValue(&hdac1, DAC_CHANNEL_1, DAC_ALIGN_12B_R, sine_wave[i]);

            i = (i + 1) % DAC_BUFFER_SIZE; // Boucle circulaire sur 100 points
        }
    }

    // Phase 1 : Démarrer l'acquisition ADC via DMA pendant que la sinusoïde continue
    ADC_Start(); // Acquisition ADC4 sur deux canaux mode scan et en DMA

    // Réinitialisation de l'index sinusoïde et du flag de fin de DMA (fft_ready)
    i = 0;
    fft_ready = 0;

    // Pendant que le transfert DMA n'est pas terminé, continuer la sinusoïde
    while (fft_ready == 0)
    {
        uint32_t now = __HAL_TIM_GET_COUNTER(&htim15);
        if ((now - last_tick) >= 1) // Avance à chaque µs
        {
            last_tick = now;
            // Mise à jour DAC à la valeur correspondante i de la table qui comporte la sinusoïde
            HAL_DAC_SetValue(&hdac1, DAC_CHANNEL_1, DAC_ALIGN_12B_R, sine_wave[i]);
            i = (i + 1) % DAC_BUFFER_SIZE; // Boucle circulaire sur 100 points
        }
    }
}

```



```

    // Phase 2 : Arrêt du DAC et du timer une fois que la mémoire ADC est remplie pour ne pas
    surcharger le CPU pendant le calcul (traitement fft et calcul conductivité)
    HAL_DAC_Stop(&hdac1, DAC_CHANNEL_1);
    HAL_TIM_Base_Stop(&htim15);
    // Tension stable après arrêt (optionnel mais plus propre de remettre à 0)
    HAL_DAC_SetValue(&hdac1, DAC_CHANNEL_1, DAC_ALIGN_12B_R, sine_wave[0]);

    // Phase 3 : Traitement FFT sur les échantillons ADC
    for (uint16_t i = 0; i < FFT_SAMPLE_SIZE; i++) {
        adc4_in_f32[i] = (float32_t)adc4_raw_samples[2 * i];      // Extraction canal d'entrée
        adc4_out_f32[i] = (float32_t)adc4_raw_samples[2 * i + 1]; // Extraction canal de sortie
    }
    // Application FFT CMSIS rapide (entrée et sortie)
    arm_rfft_fast_f32(&fft_instance, adc4_in_f32, fft_output_in, 0);
    arm_rfft_fast_f32(&fft_instance, adc4_out_f32, fft_output_out, 0);

    // Calcul du spectre d'amplitude :  $\sqrt{(\text{Re}^2 + \text{Im}^2)}$  sur chaque bin FFT
    for (uint16_t i = 0; i < FFT_SAMPLE_SIZE / 2; i++)
    {
        float re_in = fft_output_in[2 * i];
        float im_in = fft_output_in[2 * i + 1];
        fft_amplitude_in[i] = sqrtf(re_in * re_in + im_in * im_in);

        float re_out = fft_output_out[2 * i];
        float im_out = fft_output_out[2 * i + 1];
        fft_amplitude_out[i] = sqrtf(re_out * re_out + im_out * im_out);
    }

    // Extraction de l'amplitude à 10 kHz (index 330)
    // avec fs=61500 kHz, N=2048 et index=330, f = (330*61500)/2048 = 9.9kHz
    float amp_in = fft_amplitude_in[330];      // Amplitude du signal d'entrée à 10 kHz
    float amp_out = fft_amplitude_out[330];    // Amplitude du signal de sortie à 10 kHz

    // Conversion amplitude FFT → tension crête à crête
    float u1 = AmplitudeToVoltage(amp_in, FFT_SAMPLE_SIZE, VREF);
    float u4 = AmplitudeToVoltage(amp_out, FFT_SAMPLE_SIZE, VREF);
    //printf("U1 = %.4f mV | U4 = %.4f mV\r\n", u1 * 1000.0f, u4 * 1000.0f);

    // Calcul physique de la conductivité à partir de U1 et U4
    float cond = CalculConductivité(u1, u4);
    printf("Conductivite = %.2f mS/cm\r\n", cond); // Affichage en UART

    // Attente de 500 ms avant la prochaine acquisition
    HAL_Delay(500);
}

```