

RAPPORT DE STAGE

Développement d'un framework de vision 3D basé sur des acquisitions SONAR



Stage effectué de septembre 2020 à janvier 2021 au Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier (LIRMM), une unité mixte de recherche dépendant conjointement de l'Université de Montpellier et du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS)



Figure 0-1 Expérimentations sur le robot RÉMI à l'étang de Thau (Occitanie)



MARTIN LABE

Étudiant de la promotion ÉPITA 2022, Stagiaire

LIONEL LAPIERRE

Enseignant chercheur (MdC-HDR), Tuteur

ROBIN PASSAMA

Ingénieur de recherche, Encadrant

YOHAN BREUX

Chercheur postdoctoral, Référent scientifique



Table des matières

Introduction.....	1
1. Présentation de l'entreprise.....	2
1.1. Le secteur d'activité	2
1.2. Le laboratoire	2
1.3. L'équipe	2
1.4. Le positionnement du stage dans les travaux de l'équipe.....	3
1.4.1. Le Projet BIBOT	3
1.4.2. Le projet KARST.....	3
2. Travail Effectué	4
2.1. Le cahier des charges (C.D.C).....	4
2.1.1. But général	4
2.1.2. Explication détaillée des résultats à obtenir	4
2.2. Compte-rendu d'activité.....	6
2.2.1. Axes d'étude et de recherche choisis	6
2.2.2. Déroulement concret des études, expérimentations, mises au point... 7	
2.3. Développement, interprétation et critique des résultats	7
3. Conclusion générale	11
4. Bibliographie et glossaire	12
5. Annexes.....	13
5.1. Table des illustrations	13
5.2. Table des annexes.....	13

Introduction

La robotique d'exploration est un domaine passionnant qui consiste à utiliser les robots comme des vecteurs pour embarquer des capteurs dans différents environnements : terrestre, aérien, spatial et aquatique. Ils permettent d'aller dans des endroits parfois inaccessibles pour l'homme et de récolter de nombreuses données qui permettent une meilleure compréhension de notre monde. C'est ce lien particulier entre la technologie et ce qui nous entoure qui me passionne et qui m'a fait rejoindre l'année dernière le laboratoire SEAL du LSE. J'ai pu y découvrir de nombreuses problématiques. Comment donner la capacité à un robot de savoir s'il a rempli sa mission ? Comment peut-il identifier les objets qui l'entourent ? Comment peut-il s'orienter à l'aide de ce qu'il a pu voir auparavant ? Comment peut-il explorer son environnement de manière autonome ?

Ces défis technologiques autour de la thématique de la vision par ordinateur m'ont poussé à vouloir approfondir le sujet. J'ai aussi eu le désir de découvrir un milieu qui m'était encore complètement inconnu : le milieu de la recherche. Comprendre sa manière de fonctionner et comment on y travaille étaient des objectifs que je m'étais personnellement fixés pour ce stage. Faire mon stage dans un laboratoire aussi renommé que le LIRMM était une opportunité exceptionnelle. De plus le fait que le laboratoire soit en France était une chance par rapport à la crise du COVID.

Le sujet qui m'a été proposé, à savoir « Développement d'un framework de vision 3D basé sur des acquisitions SONAR » était, je dois le reconnaître assez vague. C'est seulement arrivé dans le laboratoire, et après avoir rencontré mon tuteur Lionel Lapierre, que je tiens à remercier ici, que j'ai pu enfin comprendre ce dont il s'agissait réellement et à quel point ce sujet était stimulant. J'espère le présenter dans ce rapport avec le même plaisir qu'il m'a été donné de le réaliser.

1. Présentation de l'entreprise

Le *Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier - LIRMM* - est une *unité mixte de recherche*, dépendant conjointement de l'Université Montpellier et du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) [1]. L'organigramme est disponible en Annexe 1.

1.1. Le secteur d'activité

Les missions du LIRMM sont de « produire » :

- Des *connaissances* (en moyenne trois cents publications d'audience internationale chaque année)
- Des *chercheurs* directement (docteurs, chercheurs postdoctorals) ou indirectement (participation à l'enseignement License-Master-Doctorat)
- Des *prototypes* (matériels ou logiciels)
- De l'*activité économique* à travers des partenariats industriels et la création d'entreprises innovantes
- De l'*animation scientifique* à l'échelle nationale mais aussi internationale

Les recherches menées au LIRMM trouvent généralement une finalisation dans des domaines applicatifs aussi divers que la biologie, la chimie, les télécommunications, la santé, l'environnement... et dans les domaines propres du laboratoire : l'informatique, l'électronique et l'automatique.

1.2. Le laboratoire

Les travaux sont menés dans trois départements scientifiques de recherche :

- Le *département Informatique* dont les nombreuses thématiques s'étendent des mathématiques à la recherche appliquée.
- Le *département Robotique* qui développe des nouveaux systèmes automatiques et des outils fondamentaux associés avec pour objectif de les amener à la valorisation et au transfert industriel.
- Le *département Microélectronique*, spécialisé dans la recherche de solutions innovantes pour embarquer toujours plus d'intelligence et de technologies émergentes dans les systèmes électroniques intégrés afin d'améliorer la qualité, la fiabilité, l'adaptabilité, l'efficacité (notamment énergétique) et la sécurité de ces systèmes.

Ces départements sont eux-mêmes séparés en équipes de recherche, éventuellement communes à deux départements.

1.3. L'équipe

L'*équipe EXPLORE* est composée de 6 membres permanents (2 Professeurs des Universités et 4 Maîtres de Conférence) ainsi que 8 membres non permanents (6 doctorants et deux ingénieurs de recherche). Elle travaille également en lien étroit avec des entreprises dont certaines sont issues de projets de recherche de l'équipe elle-même.

Elle spécialise ses recherches en *robotique mobile pour l'exploration de l'environnement*. Son objectif principal est de développer des outils théoriques et expérimentaux pour les milieux terrestres, marins et aériens [2]. Les thèmes abordés sont le contrôle du mouvement, la perception, la localisation, la cartographie, l'architecture contrôle/commande structurée, la tolérance aux fautes, l'autonomie, la garantie de performances, etc...

1.4. Le positionnement du stage dans les travaux de l'équipe

Le stage est financé par deux projets.

1.4.1. Le Projet BIBOT

Le premier projet se nomme *BIBOT*, issu d'un partenariat entre le LIRMM et des biologistes du département de Mayotte. L'objectif est de développer un robot capable d'évoluer dans un environnement marin afin d'y étudier la biodiversité (identifier les espèces, compter et localiser leurs individus, évaluer leurs volumes, etc).

Lien avec le stage : des capteurs sonars sont utilisés pour acquérir de nombreuses informations relatives au positionnement du robot (altimétrie, topographie, ...).

1.4.2. Le projet KARST

Le second projet est le *projet européen KARST*. Le KARST est une structure géologique particulière formée dans les souterrains des rivières. Ce sont des grottes immergées d'eau.

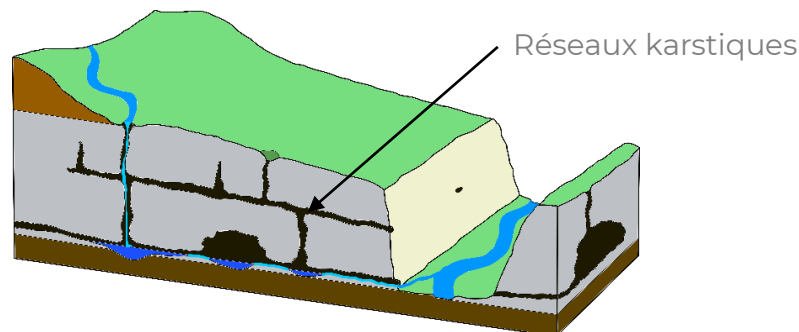


Figure 1-1 Illustration d'un type de Karst

Ces cavités sont des réservoirs naturels d'eau particulièrement intéressants. En effet, beaucoup de villes françaises les utilisent pour le pompage de l'eau. Cependant, il est très difficile d'évaluer le niveau de la ressource [3]. D'autre part, la même problématique est présente pour évaluer les risques hydro-géographiques. Ces réservoirs jouent en effet un rôle de tampon lors des intempéries et des tempêtes. Connaître leurs niveaux permettrait alors de mieux évaluer les risques d'inondation, et ce, dans des régions particulièrement exposées comme le sud de la France. L'objectif de ce projet est donc de développer un robot capable d'explorer le karst et de le cartographier.

Lien avec le stage : l'eau karstique n'étant pas forcément limpide, l'utilisation de systèmes optiques y est proscrite. Il faut alors utiliser des sonars.

2. Travail effectué

2.1. Le cahier des charges (C.D.C)

Le cahier des charges est issu des exigences des deux projets précédemment cités. Cependant l'objectif du stage s'inscrit également dans une démarche plus globale de développement d'outils *génériques* pour les missions futures de l'équipe.

2.1.1. But général

L'objectif du laboratoire est de développer un framework qui permette aux robots de faire de la vision par ordinateur en utilisant une *perception acoustique* de l'environnement. Il s'agit ici de proposer de la *généricité* et de la *simplicité* afin d'utiliser pleinement tous les capteurs sonars qui peuvent être embarqués dans un robot.

Ce framework doit gérer toute la chaîne de traitement depuis *l'acquisition des données brutes* jusqu'à leur *reconstruction finale* en trois dimensions. Il a vocation à être utilisé :

- En *retour de mission* pour effectuer le rendu final de l'environnement
- En « *ligne* », c'est-à-dire par le robot lui-même pendant son exploration

Dans le premier cas il faudra un rendu global particulièrement fidèle et épuré obtenu avec l'intégralité de la chaîne de traitement pour la transmettre aux spécialistes. En revanche, dans le second, contraint par un traitement en *temps réel* et une *puissance de calcul* plus faible, il faudra une version allégée de l'environnement global afin de se localiser (SLAM) et d'être capable de revenir au point de départ dans une démarche d'exploration autonome. Il faudra également l'environnement local pour permettre au robot de se positionner (au centre de la grotte par exemple) et d'éviter d'éventuels obstacles.

2.1.2. Explication détaillée des résultats à obtenir

Les différents types de sonars utilisés

Le framework doit permettre l'utilisation de plusieurs types de sonars, ainsi que le support des modèles spécifiques utilisés par les prototypes actuels du laboratoire. De plus il faut être capable lors d'une utilisation en ligne de communiquer directement avec eux, et lors d'une utilisation en retour de mission de les émuler à partir des données de retour. La liste exhaustive est présentée ici car son élaboration a fait partie intégrante du stage et fait office de cahier des charges :

- Les **échosondeurs** (ou ping) : sondeur acoustique fixe et mono faisceau. Un transducteur émet une onde sonore, lorsqu'elle rencontre un obstacle l'onde est réfléchiée et le transducteur la reçoit à nouveau, obtenant ainsi son intensité et le temps parcouru. Ils sont typiquement utilisés comme sondeur bathymétrique.
Les modèles du laboratoire : [Tritech - PA200/ PA500](#), [ImpactSubsea - ISA500](#), [BlueRobotics - Ping Sonar Altimeter and Echosounder](#)
- Les **échosondeurs multifaisceaux** : sondeur acoustique fixe et avec plusieurs faisceaux directionnels. Plusieurs transducteurs agissent

simultanément. Ils sont typiquement utilisés pour la cartographie des fonds marins lorsqu'ils sont fixés à la coque d'un bateau.

Les modèles du laboratoire : [Imagenex Model 837 "Delta T"](#)

- Les **MSIS** (Mechanically scanning imaging sonar) : le transducteur effectue un ping puis tourne à l'aide d'un servomoteur. Une rotation complète s'effectue en plusieurs secondes. Ils sont typiquement utilisés pour la cartographie des cavités sous-marines.

Les modèles du laboratoire : [Micro-sonar de Tritech](#), [Super SeaKing DFP - Dual Frequency Profiler](#), [BlueRobotics - Ping360 Scanning Imaging Sonar](#)

- Les **caméras acoustiques** : une matrice 2D de transducteurs permet d'obtenir un ping par transducteur et une image par reconstruction

Les modèles du laboratoire : [Teledyne BlueView M Serie](#)

Reconstruction probabiliste

Les robots embarquent de nombreux capteurs. Chacun d'entre eux permet de relever des mesures auxquelles sont associées des incertitudes. Les incertitudes peuvent rester invariantes au fil d'une mission, mais peuvent aussi évoluer, et même s'accumuler dans certains cas (comme l'odométrie).

Pour éviter une trop grande dérive de ces informations par rapport à la réalité, plusieurs stratégies peuvent être mises en place. La stratégie du laboratoire, développée par Yohan Breux [4] est de fusionner les mesures et les incertitudes issues des deux capteurs MSIS (horizontal et vertical) afin d'utiliser leurs redondances et d'obtenir une reconstruction beaucoup plus fiable. Un schéma du robot avec ses capteurs MSIS est disponible en [Annexe 2](#).

Le framework devra proposer les outils nécessaires à l'intégration de ces algorithmes.

Technologies et bibliothèques

Le framework doit à terme s'intégrer au framework plus global développé en interne par l'équipe et devra respecter la même architecture.

Par ailleurs, le framework devra respecter la portabilité des autres projets du laboratoire. Il sera développé en C++ 17 et les packages utilisés seront :

- [Eigen](#) pour les transformations et calculs mathématiques
- Point Cloud Librairie ([PCL](#)) pour gérer les nuages de points
- Visualization Toolkit ([VTK](#)) pour l'affichage

L'outil d'inclusion des packages ne sera pas CMake, mais [PID](#), spécialement développé en interne pour gérer la portabilité sur les robots et les machines spécifiques utilisés par l'équipe.

Utilisation du framework

Le framework devra être générique pour que tous les types de sonars puissent être utilisés, et que ceux de la même nature puissent être utilisés de la même façon.

Le framework devra être simple. Chaque fonctionnalité devra être isolée dans une brique de traitement. Les traitements des données se feront en utilisant des pipelines.

2.2. Compte-rendu d'activité

2.2.1. Axes d'étude et de recherche choisis

Modélisation et outils

Le premier axe d'étude a été la prise en main des trois bibliothèques et de l'outil interne de l'équipe. Il a fallu évaluer les fonctionnalités existantes afin de les intégrer et d'adapter les contraintes métiers aux contraintes techniques. Plus particulièrement, c'est dans cette partie que des solutions techniques ont été choisies pour modéliser les points, les nuages de points et choisir la manière de les stocker et d'appliquer les traitements avec toutes les contraintes du cahier des charges (généricité, faible coût mémoire et faible puissance pour traitement).

Pipelines

Le deuxième axe a été de créer des pipelines en partant des situations les plus simples pour aller jusqu'aux situations les plus complexes. Pour cela, il a fallu imaginer et isoler toutes les fonctionnalités, organiser leurs utilisations tout en prenant en compte les besoins actuels et futurs de l'équipe. Voir l'Annexe 3.

Les briques décrites sont les suivantes :

- Reading : lit les données extraites du fichier csv correspondant au capteur pour un retour de mission ou communique avec un capteur « en ligne (2.1.1) »
- Filtering : filtre les données brutes du sonar (threshold, group, offset)
- Transforming : change un point d'un repère vers un autre
- Pushing : enregistrement du point dans le nuage de point en construction
- Display : utilise un composant d'affichage (2D ou 3D) pour interagir avec le nuage de point

Architecture du framework

Un troisième axe a été l'organisation des fonctionnalités pour permettre à l'utilisateur final de retrouver facilement les composantes du framework et d'organiser son code avec clarté. Il a aussi fallu assurer la compatibilité avec l'architecture du framework globale de l'équipe. Pour cela trois espaces ont été délimités :

- Le *sensor space* (Annexe 4) : relatif aux capteurs sonars, de positions, aux données qu'ils génèrent, etc
- Le *3d space* (Annexe 5) : relatif aux transformations en 3D, changements de repères, etc
- Le *display space* (Annexe 6) : relatif à l'affichage des données manipulées

Un dernier espace a été utilisé pour les fonctions transverses (*utils space*).

Outils et représentations mathématiques

Le dernier axe d'étude a été la recherche et le choix des outils mathématiques pour les points spécifiques suivants.

- Outils d'interpolation matricielle pour estimer la position du robot entre deux relevés odométriques

- Représentation des repères (translation + rotation) légère en mémoire et efficace dans les calculs de composition
- Manière d'implémenter la propagation des incertitudes dans tous les cas rencontrés (passage entre les repères capteurs, robot et monde, conversion des représentations utilisées, ...)

2.2.2. Déroulement concret des études, expérimentations, mises au point...

Déroulement concret des études

Le stage s'est articulé autour deux productions indépendantes : le framework pour la vision par sonars, et une librairie de calcul pour gérer les incertitudes qui a vocation à être incluse dans plusieurs projets dont le framework.

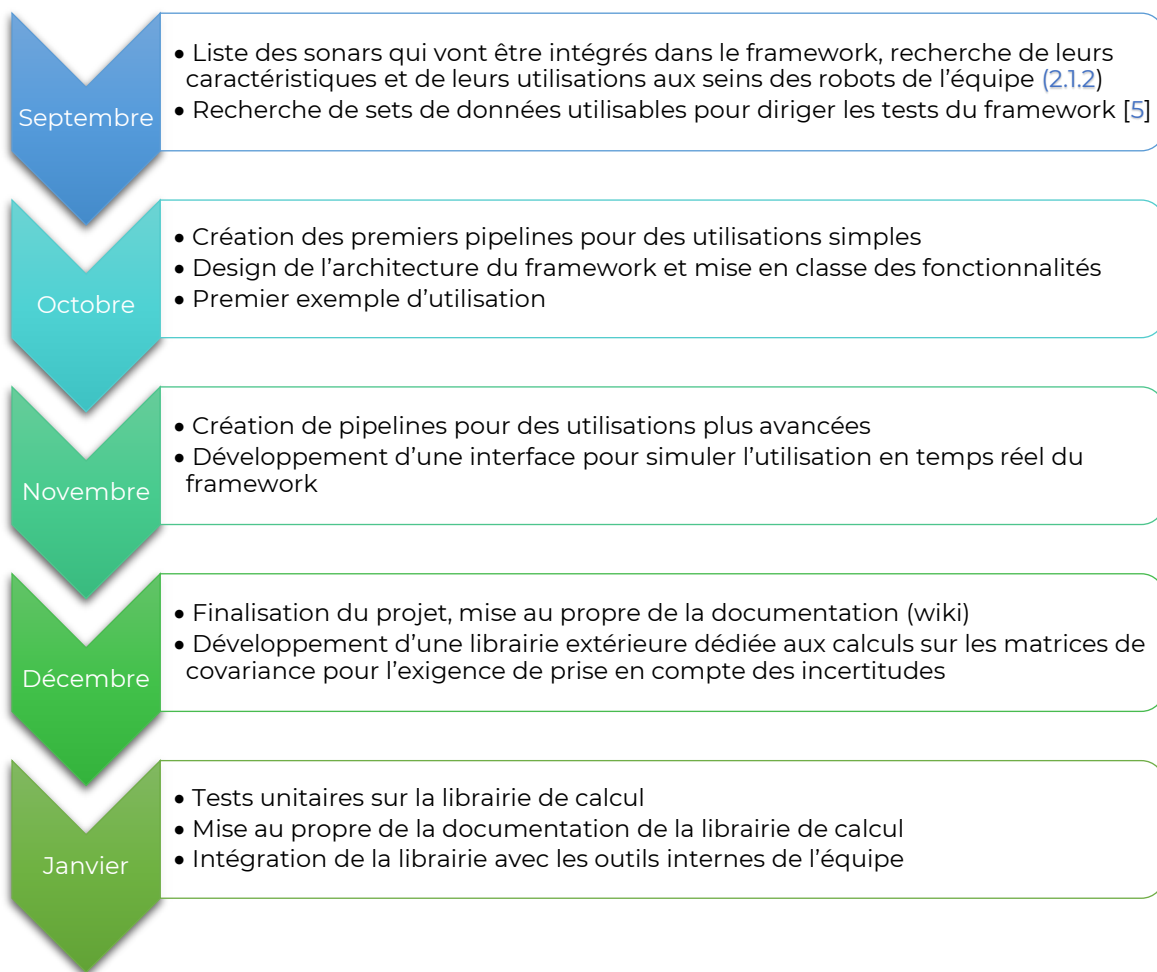


Figure 2-1 Chronogramme détaillé

Expérimentation du framework de vision

Pour tester le framework de vision, les données de l'université de Gérone ont été utilisées. Il s'agit des données odométriques et des données sonars récupérées par un véhicule sous-marin autonome lors de l'exploration du complexe de grottes sous-marines « *Coves de Cala Viuda* », situé en Espagne [5]. Il s'agit d'un cas extrêmement proche du projet KARST. Ces données ont permis de tester les fonctionnalités et de valider les choix de modélisation tout en vérifiant les exigences de performance du cahier des charges.

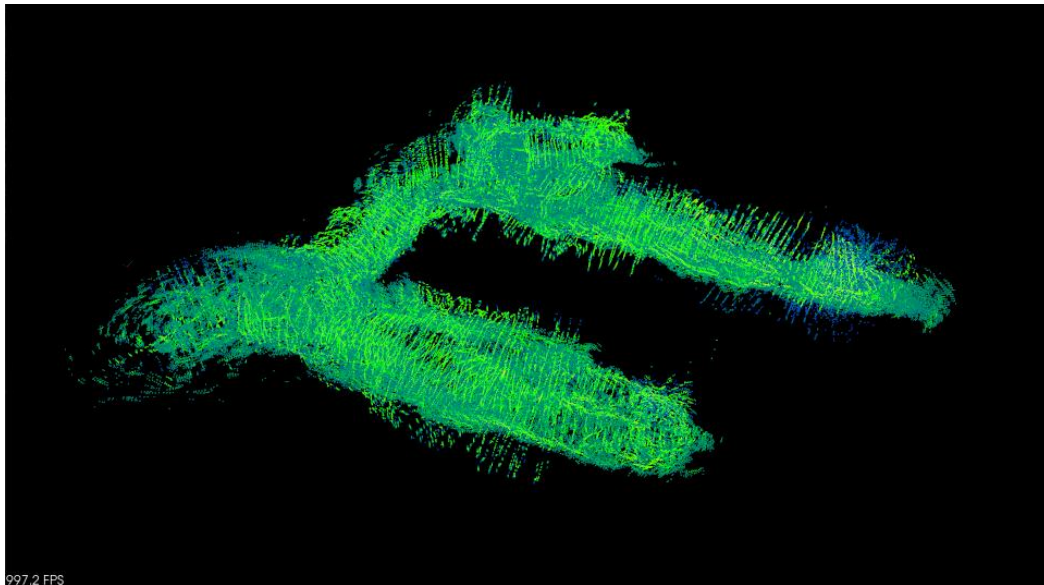


Figure 2-2 Reconstruction des grottes obtenues avec le framework sans prise en compte des incertitudes

Cette expérimentation a été particulièrement intéressante puisqu'elle a mis en lumière la nécessité de laisser l'utilisateur paramétrer le filtrage des données et de vérifier les résultats. Des outils ont par la suite, été spécifiquement développés à ces fins. Un exemple en Annexe 7.

Expérimentation de la librairie de calcul

Pour tester la librairie de calcul, deux stratégies ont été mises en place.

La première concerne les fonctions principales accessibles par l'utilisateur. Il peut s'agir de composer un point avec un repère, de changer de représentation, etc... Des fichiers csv avec entrées et sorties de référence ont été générés pour valider leur bon fonctionnement. Des cas particuliers ont été ajoutés aux cas générés aléatoirement avec la librairie MRPT [6] ce qui a permis d'évaluer toutes les utilisations et les performances de calcul.

La deuxième stratégie a été de tester unitairement toutes les fonctions intermédiaires (que les utilisateurs plus avancés peuvent être à même d'utiliser). Des erreurs dans ces fonctions peuvent s'annuler entre elles (typiquement le cas du moins et du moins qui fait plus). Il a donc été primordial de tester toutes les fonctions. Il s'agissait essentiellement de matrices jacobiniennes. Une matrice jacobienne est une matrice des dérivées partielles du premier ordre d'une fonction vectorielle [7]. Pour vérifier que leurs valeurs analytiques étaient correctes, les jacobiniennes numériques ont été génériquement calculées sur plusieurs points et comparées à epsilon près aux jacobiniennes analytiques.

Expérimentation du framework global de l'équipe

La dernière expérimentation concerne le framework global de l'équipe. Pour comprendre comment était concrètement utilisé le framework, comment il interagissait avec les sonars et à quel stade en était son développement, j'ai pu participer à des expériences terrains au lac de Thau. Voir en Annexe 8, Annexe 9 et Annexe 10.

2.3. Développement, interprétation et critique des résultats

Concernant le framework de vision

Le framework a été développé en satisfaisant la plupart des exigences initiales.

- La généralité a été au cœur de son architecture de manière à ce que l'ajout d'un modèle de sonar ou d'une méthode d'odométrie ne change en rien son utilisation.
- Toutes les fonctionnalités et les classes ont été encapsulées dans des espaces précis pour que l'utilisateur les retrouve facilement comme cela est montré en Annexe 4, Annexe 5 et Annexe 6.
- Des pipelines ont été conçus et des exemples de leurs implémentations ont été fournis à l'utilisateur.
- Les structures de données utilisées ont été choisies de manière à minimiser la mémoire et maximiser la rapidité des opérations. Dans l'interface de fonctionnement en temps réel simulé, et avec une puissance de calcul semblable à celle d'un robot, le framework était suffisamment rapide pour traiter 99,4% du flux de données.
- Cela permet de valider également l'exigence d'utilisation en ligne et en retour de mission.
- Les dépendances aux bibliothèques extérieures ont strictement été respectés

En revanche, certaines exigences, bien qu'intégrées dans toutes les phases de réflexion et de développement n'ont pas pu aboutir dans la version finale.

- La reconstruction probabiliste n'a pas pu être intégrée. La bibliothèque de calcul sur les incertitudes a été produite et il ne manque que son intégration dans le code du framework. Ceci devrait être une tâche extrêmement simple.
- Tous les types de sonars du cahier des charges n'ont pas pu être ajoutés. Cela concerne les caméras acoustiques et les échosondeurs multifaisceaux. Il s'est avéré durant le projet que ce n'était pas une priorité pour le laboratoire et il a été décidé de les abandonner pour travailler uniquement sur les pings et les MSIS, au cœur du projet KARST.

Concernant la librairie de calcul

De la même manière la majorité des exigences ont été vérifiées.

- Le choix de la représentation des repères (translation et rotation) s'est fait de manière à optimiser le temps de calcul et l'espace mémoire utilisé. Un vecteur de translation et un quaternion ont été utilisés à ces fins.
- La fiabilité de la librairie a été garantie par les nombreux tests unitaires

En revanche, le développement de cette librairie a été particulièrement difficile. La période du confinement a réduit les contacts avec mon référent scientifique et j'ai eu beaucoup de mal à debugger mon code. Les objets mathématiques utilisés ne m'étaient clairement pas familiers (fonctions matricielles, nombres hypercomplexes, matrices jacobiniennes, interpolation matricielle) et j'ai eu la sensation de manquer de recul pour interpréter les nombreuses erreurs inhérentes au développement de

la librairie. Les mathématiques utilisées ici n'étant clairement pas mon expertise, j'ai eu l'impression de ne pas avoir pu utiliser toutes mes compétences dans la réalisation de ce travail.

Par ailleurs, je n'ai pas pu effectuer l'optimisation des calculs, ce qui est particulièrement dommage car cela réduit considérablement la valeur ajoutée de la librairie.

3. Conclusion générale

En conclusion, le sujet du stage était complet et abordait des problématiques variées et intéressantes. Pour réaliser ce stage, un long travail a dû être fourni pour comprendre les besoins de l'équipe afin d'exprimer un cahier des charges clair, concis et réalisable dans la durée imposée. Cela m'a permis de séparer mon travail en deux productions et j'ai particulièrement apprécié cette progression que j'ai pu avoir durant les quatre mois passés au laboratoire.

Mon travail aura surtout permis à l'équipe de proposer une manière d'intégrer et de standardiser la gestion de données sonars. La généricité a été un mot d'ordre fondamental au moment où l'équipe EXPLORE traversait une période de transition charnière puisqu'elle était en train de se renouveler. De nombreuses personnes devraient venir se joindre à elle avec des nouvelles perspectives de recherche. J'espère que dans ce contexte mon travail pourra s'avérer utile sur de nouvelles problématiques ou avec de nouveaux prototypes. De même l'intégration des incertitudes dans les calculs pour les transformations spatiales pourra faciliter l'utilisation des modèles de reconstruction probabiliste et j'espère que cela pourra contribuer à l'obtention de résultats plus précis.

Les conditions sanitaires particulières auront irrémédiablement eu une influence dans ma manière de travailler. L'encadrement que j'ai reçu est resté excellent durant cette période, néanmoins les interactions avec mes collègues ont naturellement été réduites avec le confinement et avec elles ma productivité. Je regrette de ne pas avoir pu aller plus loin dans l'aboutissement de mon stage. J'aurais particulièrement aimé pouvoir fusionner les deux projets à la fin pour intégrer la librairie de calcul sur les incertitudes au framework afin de voir l'amélioration dans la reconstruction des environnements en 3D.

Hormis ce léger manque de temps sur la fin, le stage a été une grande réussite par rapport aux objectifs que je m'étais fixés. Le stage m'aura encore plus fait apprécier la robotique d'exploration. J'ai adoré travailler dans ce domaine et y développer autant de compétences transversales. Malgré ma formation initiale très orientée en sciences de l'ingénieur, j'ai surtout confirmé mon intérêt pour ce qui est communément appelé "le haut niveau", c'est à dire lorsqu'on se sépare des problématiques matérielles du robot et qu'on cherche à fournir de l'abstraction et des fonctionnalités plus poussées. Enfin la recherche m'a formidablement intéressé, et j'aimerais commencer le début de ma carrière en développant cet aspect. Peut-être dans des laboratoires, dans des ministères ou dans des départements R&D d'entreprises, à vrai dire je ne sais pas trop pour le moment. Néanmoins cette expérience a particulièrement mûri mon projet professionnel.

4. Bibliographie et glossaire

- [1] LIRMM, «Présentation du laboratoire,» [En ligne]. Available: <http://www.lirmm.fr/le-lirmm/presentation>. [Accès le 2021].
- [2] LIRMM, «Présentation de l'équipe EXPLORE,» [En ligne]. Available: <https://www.lirmm.fr/recherche/equipes/explore>. [Accès le 2021].
- [3] M. BAKALOWICZ, «Le karst, ressource en eau renouvelable dans les roches calcaires,» Encyclopédie de l'environnement, 27 06 2018. [En ligne]. Available: https://www.encyclopedie-environnement.org/eau/karst-ressource-eau-renouvelable-roches-calcaires/#5_Lexploitation_de_leau_souterraine_dans_le_karst. [Accès le 2020].
- [4] L. L. Yohan Breux, «Elevation Angle Estimations of Wide-Beam Acoustic Sonar Measurements for Autonomous Underwater Karst Exploration,» 20 07 2020.
- [5] E. V. R. C. M. C. Angelos Mallios, «Underwater caves sonar data set,» Universitat de Girona, 4 10 2017. [En ligne]. Available: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0278364917732838>.
- [6] A. Mallios, E. Vidal et R. & C. M. Campos, « Underwater caves sonar and vision data set,» Universitat de Girona, [En ligne]. Available: <https://cirs.udg.edu/caves-dataset/>.

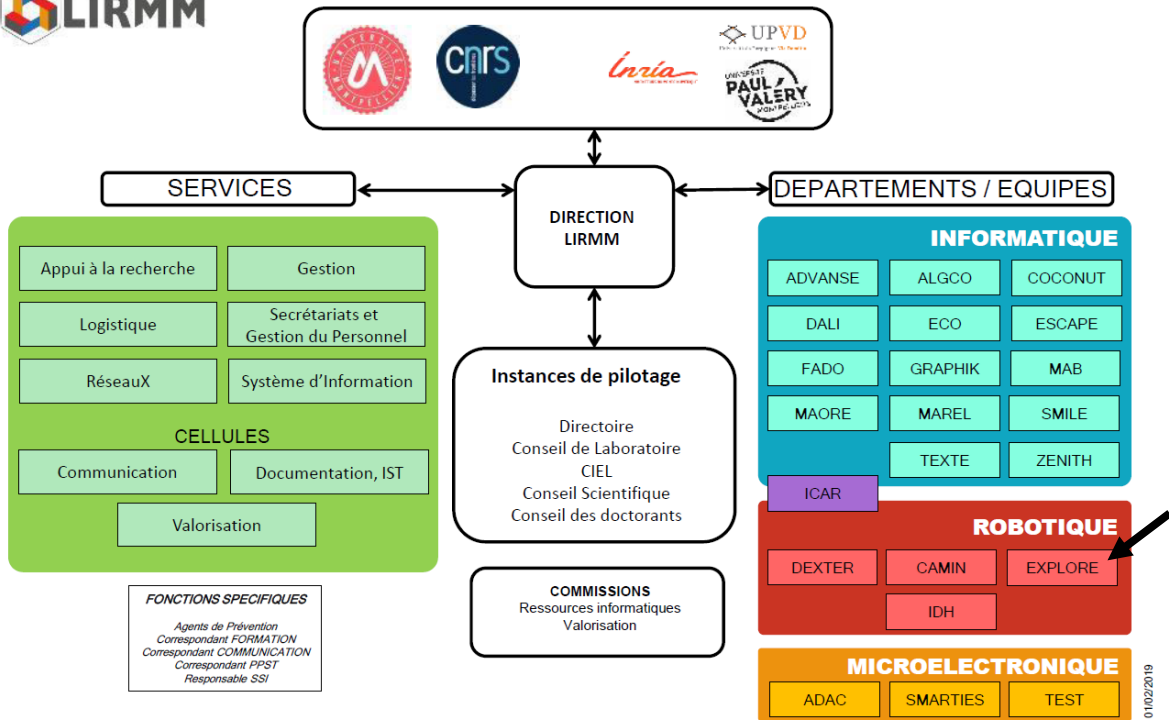
5. Annexes

5.1. Table des illustrations

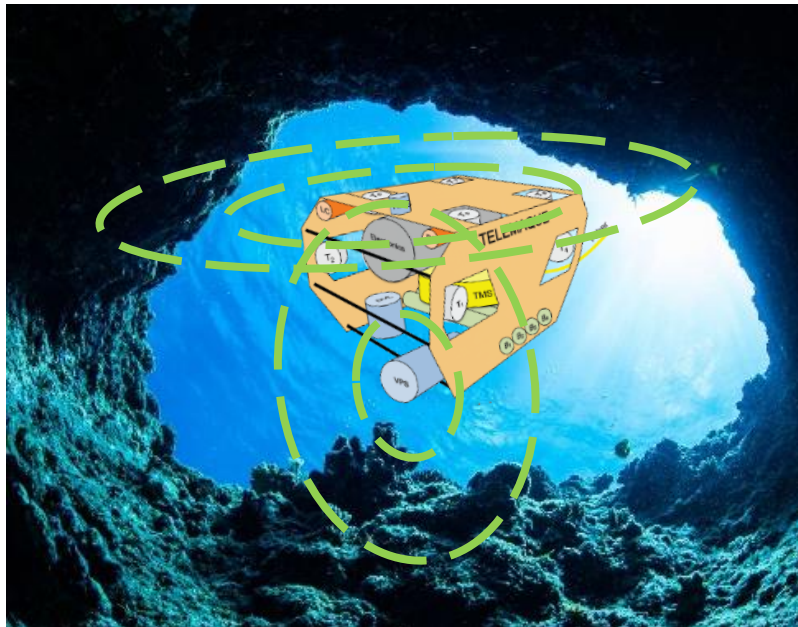
FIGURE 0-1 EXPERIMENTATIONS SUR LE ROBOT RÉMI A L'ETANG DE THAU (OCCITANIE).....	1
FIGURE 1-1 ILLUSTRATION D'UN TYPE DE KARST	3
FIGURE 2-1 CHRONOGRAMME DETAILLE	7
FIGURE 2-2 RECONSTRUCTION DES GROTTES OBTENUES AVEC LE FRAMEWORK SANS PRISE EN COMPTE DES INCERTITUDES	8

5.2. Table des annexes

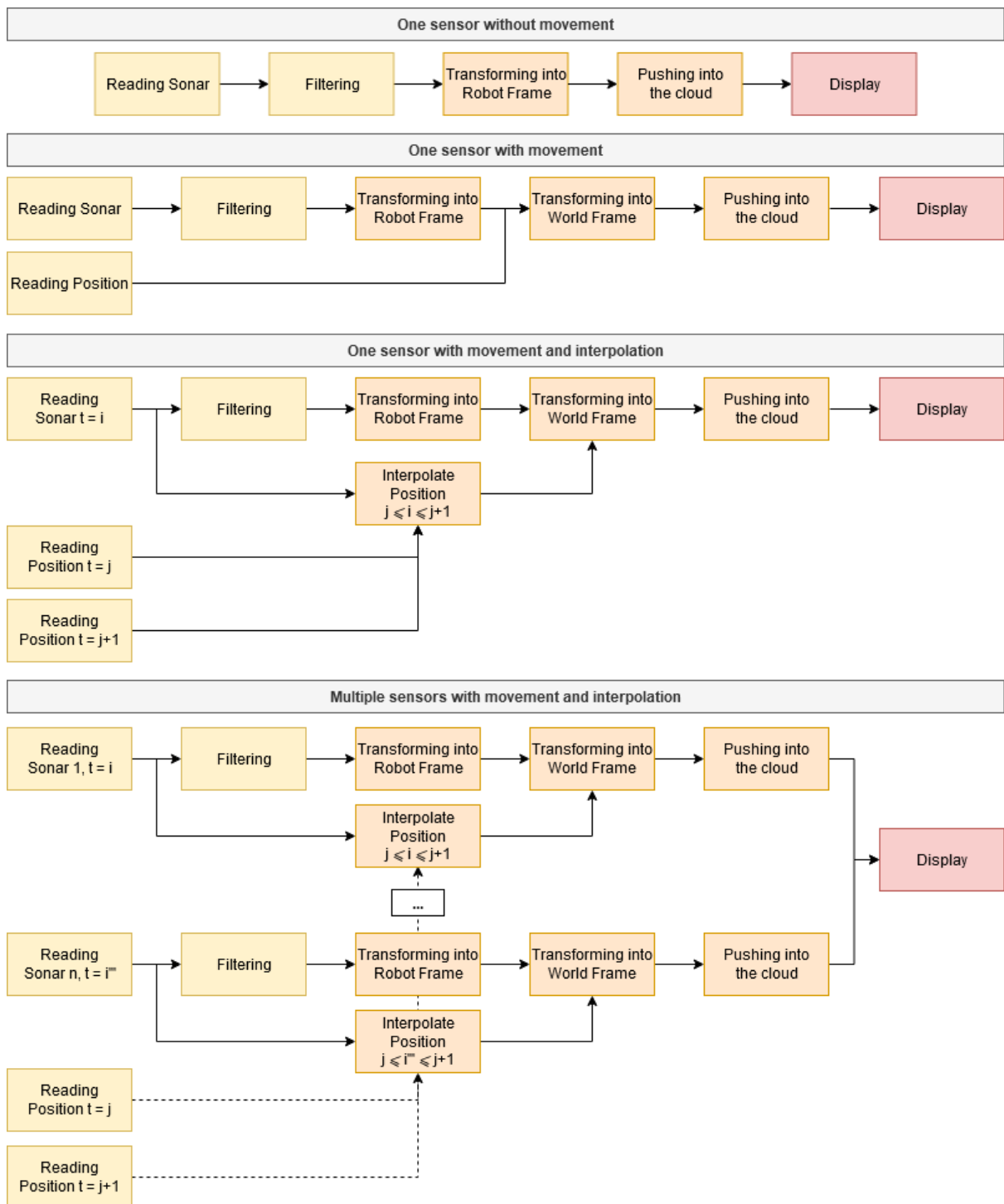
ANNEXE 1 ORGANIGRAMME DU LIRMM.....	14
ANNEXE 2 LE ROBOT TELEMAQUE UTILISE UN MSIS HORIZONTAL ET UN MSIS VERTICAL POUR RECONSTRUIRE LES GROTTES SOUS-MARINES QU'IL EXPLORE EN 3D	14
ANNEXE 3 LES PIPELINES CORRESPONDANTS AUX PRINCIPAUX CAS D'UTILISATION, LES COULEURS UTILISEES CORRESPONDENT AVEC L'ARCHITECTURE PRESENTEES ENSUITE.....	15
ANNEXE 4 DESCRIPTION DETAILLEE DU SENSOR SPACE.....	16
ANNEXE 5 DESCRIPTION DETAILLEE DU 3D SPACE.....	17
ANNEXE 6 DESCRIPTION DETAILLEE DU DISPLAY SPACE	17
ANNEXE 7 POINTS NON-FILTRES OBTENUS PAR UNE ROTATION COMPLETE DU SONAR. LA COULEUR DES POINTS DENOTE L'INTENSITE DE L'ECHO CAPTE PAR LE SONAR. CETTE FIGURE PERMET A L'UTILISATEUR DE TROUVER LES PARAMETRES DU FILTRE A APPLIQUER POUR DEBRUITER LES DONNEES BRUTES.	18



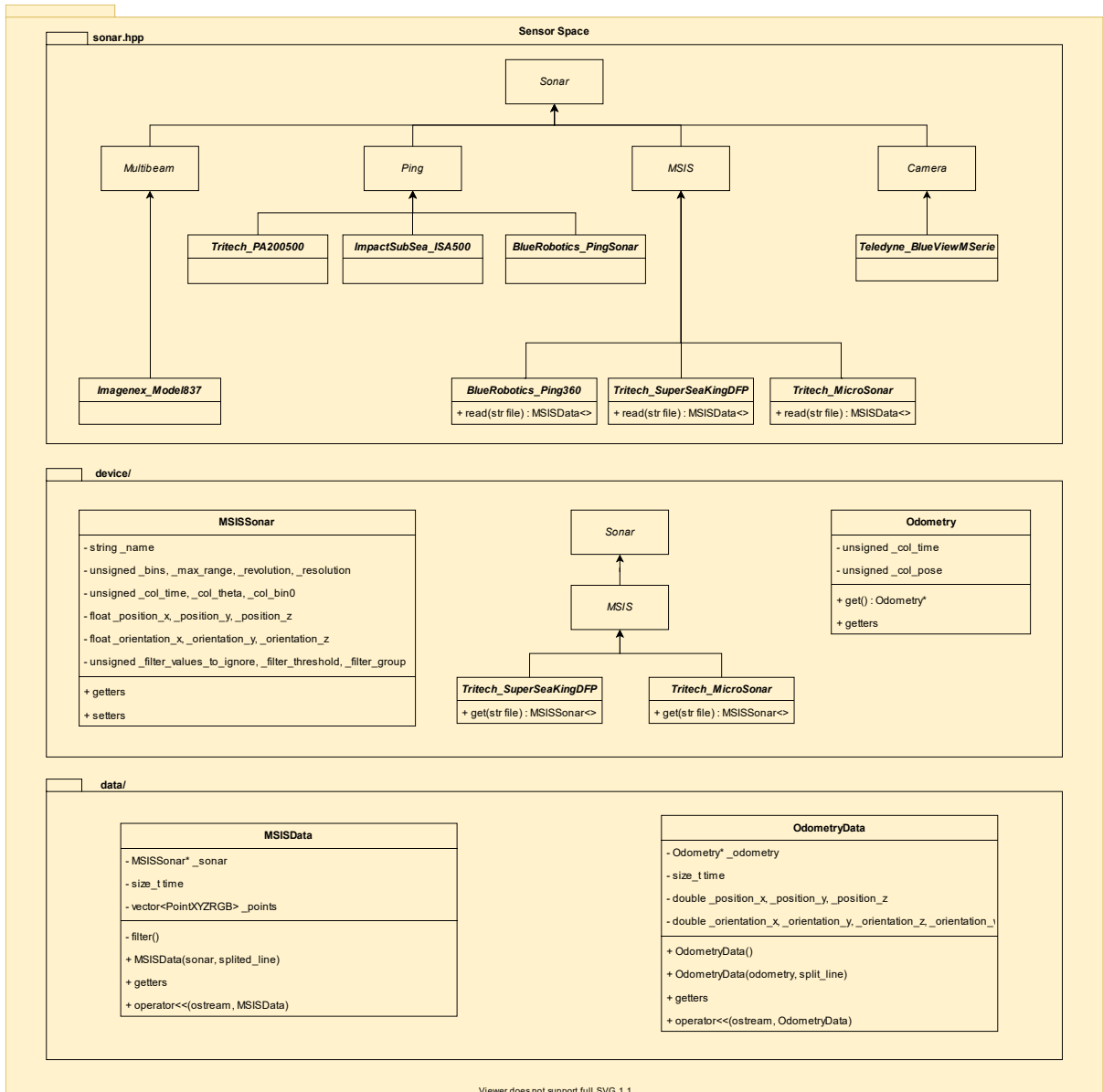
Annexe 1 Organigramme du LIRMM



Annexe 2 Le robot Télémaque utilise un MSIS horizontal et un MSIS vertical pour reconstruire les grottes sous-marines qu'il explore en 3D

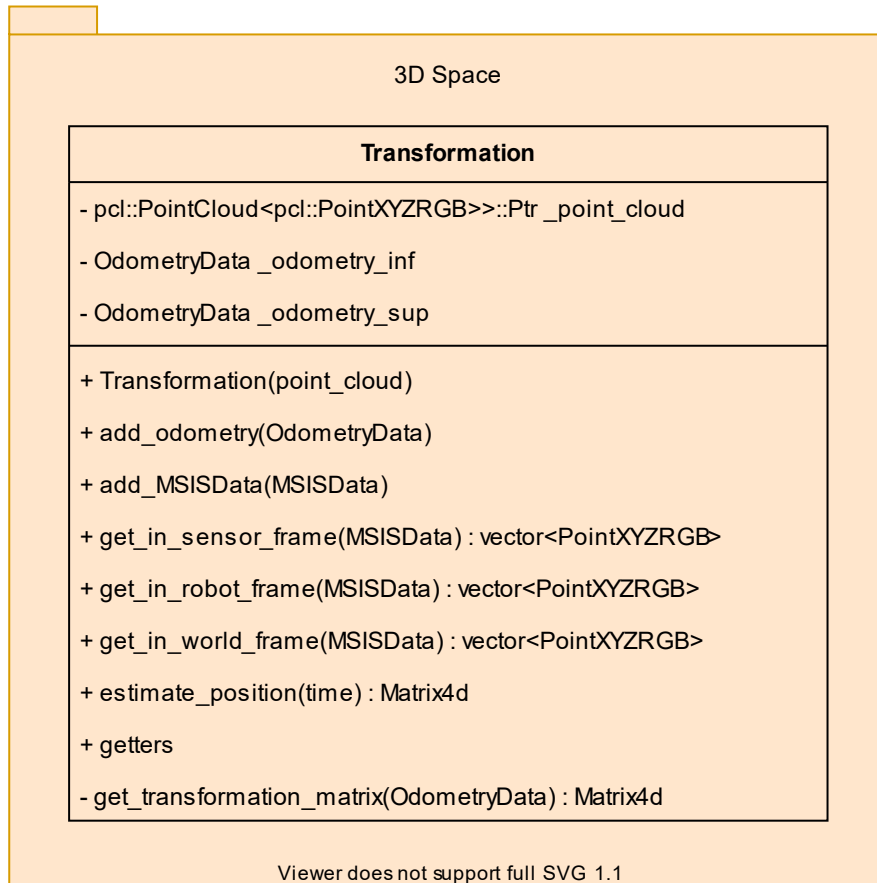


Annexe 3 Les pipelines correspondants aux principaux cas d'utilisation, les couleurs utilisées correspondent avec l'architecture présentée ensuite

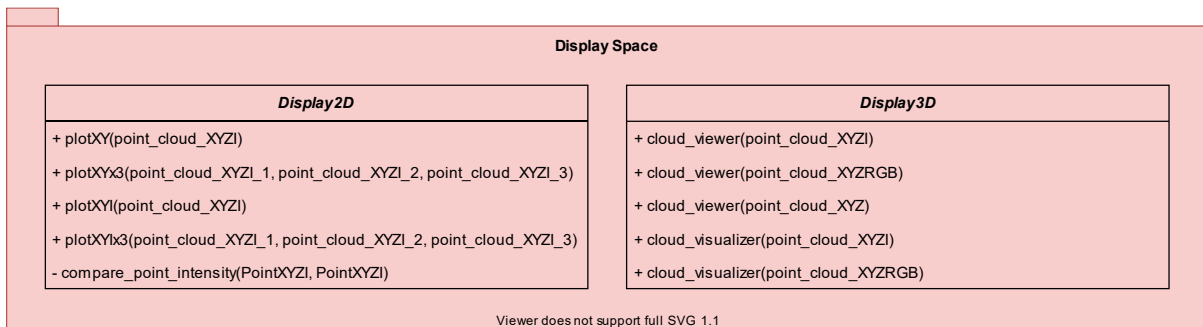


Viewer does not support full SVG 1.1

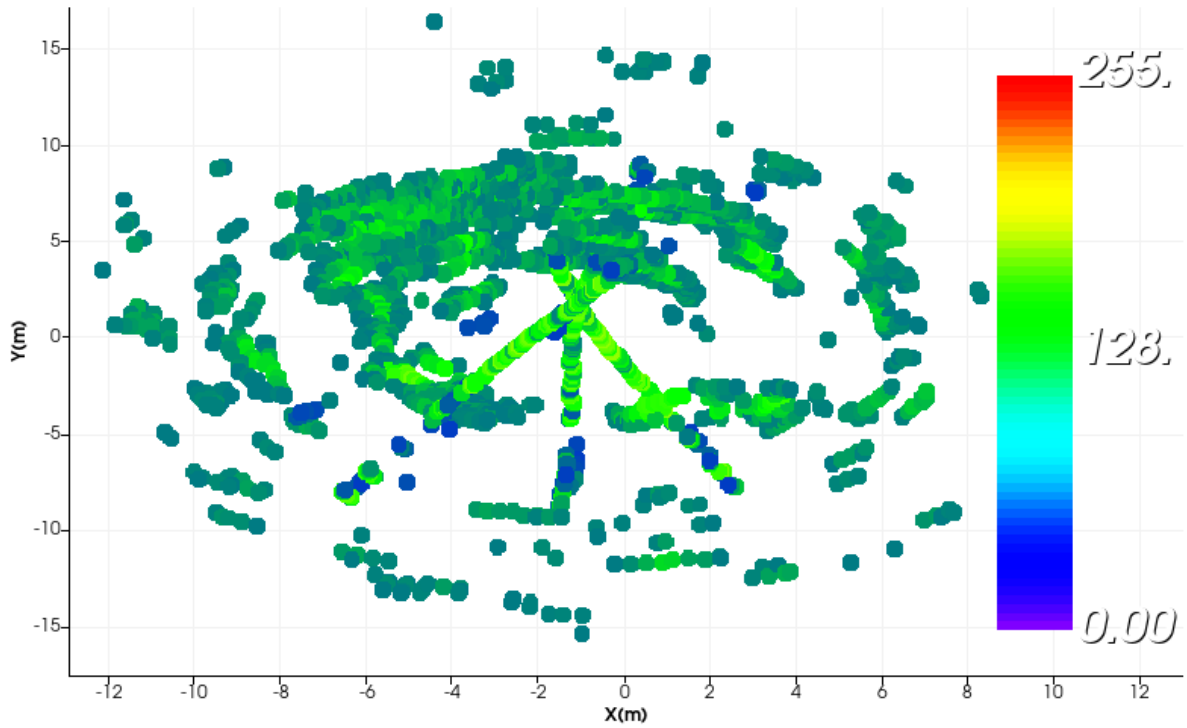
Annexe 4 Description détaillée du sensor space



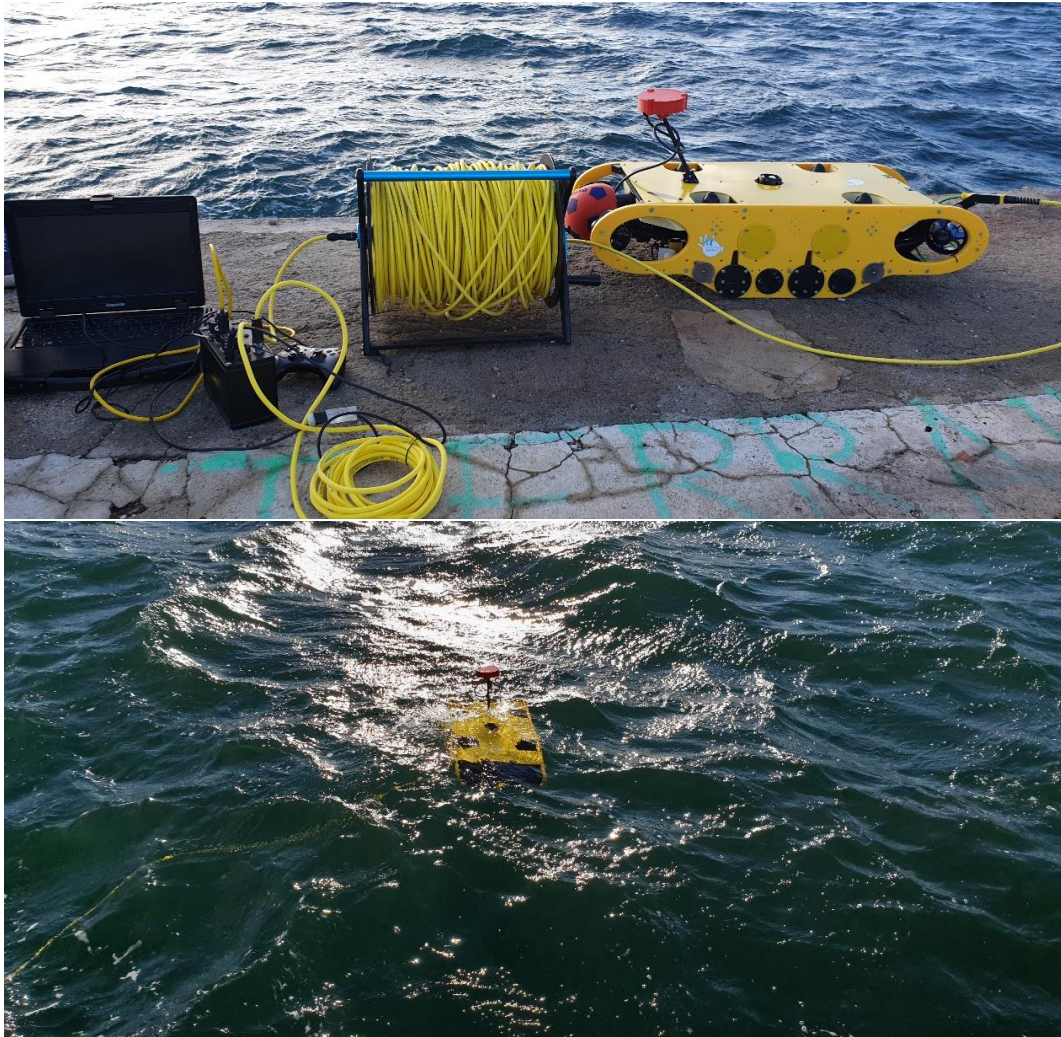
Annexe 5 Description détaillée du 3D space



Annexe 6 Description détaillée du display space



Annexe 7 Points non-filtrés obtenus par une rotation complète du sonar. La couleur des points dénote l'intensité de l'écho capté par le sonar. Cette figure permet à l'utilisateur de trouver les paramètres du filtre à appliquer pour débruiter les données brutes.



Annexe 8 Test du robot REMI du LIRMM à l'étang de Thau avec Adrien Hereau et José Luis Vilchis Medina



Annexe 9 Installation de la station sol, mise à l'eau (30 Kg !) et début des tests. Le premier consistait à la vérification du comportement lors de la perte d'un moteur, le deuxième à l'acquisition de la profondeur avec un sonar de type ping et le dernier à la mise en place du mode sécurité lorsque le robot arrive trop proche d'un obstacle



Annexe 10 Fin de test, retour au LIRMM et dessalage pour poursuivre les travaux