

14 AVRIL 2025

# PROJET DE ROBOTIQUE EXPERIMENTALE

RAPPORT FINAL

LEO DE SUE & VICTOR ROSSIGNOL

ROBO IV 2024 /2025

## Table des matières

INTRODUCTION :	1
I - Historique :	2
1.1 Historique de la structure de NEMO :	2
1.2 Problèmes rencontrés et limite du premier design :	2
II - Refonte mécanique :	3
2.1 Architecture repensée :	3
2.2 Configuration Heavy : définition.....	3
2.3. Contraintes de conception et intégration .....	4
2.4 Rendu final de la structure :	7
III – Electronique embarquée :	8
3.1. Architecture générale .....	8
3.2. Capteurs et actionneurs .....	9
IV - Architecture logicielle :	10
4.1. Ardusub sur Pixhawk :	10
4.2. ROS2 sur Raspberry Pi 3 ModelB :	11
Conclusion :	12
Bibliographie :	13

# INTRODUCTION :

Les massifs coralliens, véritables joyaux de la biodiversité marine, jouent un rôle fondamental dans l'équilibre des écosystèmes océaniques. Ils abritent près de 25 % de la vie marine connue, protègent les littoraux contre l'érosion et les tempêtes, et représentent une ressource essentielle pour des millions de personnes à travers la planète. Mais ces écosystèmes, à la fois complexes et fragiles, sont aujourd'hui menacés par l'intensification des pressions humaines : changement climatique, acidification des océans, surpêche et pollution en tête.

Face à cette urgence écologique, le projet NEMO a vu le jour : un robot sous-marin conçu pour l'observation et la collecte de données dans les récifs coralliens. Capable de mesurer des paramètres environnementaux tels que le pH, la pression et la température, tout en retransmettant des images en temps réel grâce à une caméra embarquée, NEMO vise à devenir un outil modulaire, autonome et robuste au service de la recherche marine et de la conservation.

L'année universitaire 2023-2024 a permis la concrétisation d'une première version du robot répondant au Standard 1, c'est-à-dire un robot filoguidé, télécommandé depuis la surface et capable de collecter des données environnementales de manière fiable. Cependant, à la suite d'un incident structurel lié à une défaillance d'étanchéité au niveau d'un joint, la version finale de cette première itération a subi des dégâts irréversibles, compromettant toute nouvelle mise à l'eau.

Cet événement a marqué un point de rupture, mais aussi une opportunité de réévaluer les choix techniques initiaux. Nous avons ainsi décidé de repartir sur une refonte complète de la structure, en intégrant cette fois-ci une Pixhawk, contrôleur de vol utilisé dans de nombreux véhicules autonomes, y compris des drones sous-marins professionnels. Cette intégration a modifié en profondeur l'architecture du système embarqué et a nécessité une révision complète de la mécanique, du routage des câbles, de la stabilisation et du contrôle moteur.

Ce changement d'approche, bien qu'ambitieux, a impliqué un report de la mise à l'eau du nouveau NEMO, au profit d'un développement plus abouti et d'un robot plus modulaire et fiable à long terme. La version actuelle repose désormais sur une structure renforcée à 8 moteurs de type "Heavy", inspirée du BlueROV2, pour offrir une manœuvrabilité optimale dans les six degrés de liberté (6 DOF).

# I - Historique :

## 1.1 Historique de la structure de NEMO :

La première version de NEMO a été conçue au cours de l'année universitaire 2023-2024. Cette itération initiale s'est appuyée sur une structure fabriquée en impression 3D PETG, associée à un tube central en plexiglas transparent pour l'intégration de l'électronique. L'architecture retenue reposait sur un système de 6 moteurs brushless étanches (4 moteurs pour la translation horizontale, 2 pour les mouvements verticaux), chacun contrôlé via un ESC bidirectionnel. Ce design s'inspirait principalement du BlueROV2 dans sa version classique.

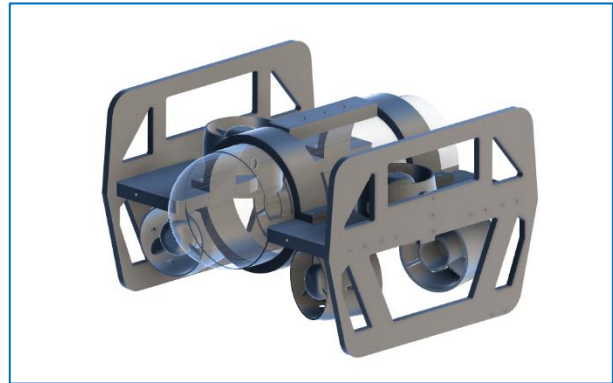


Figure 1 : Rendu réel et conception de la première version de NEMO

## 1.2 Problèmes rencontrés et limite du premier design :

Malgré un fonctionnement convaincant lors des premiers tests à sec et en bassin, plusieurs limites structurelles sont rapidement apparues :

- Étanchéité partielle : la structure 3D imprimée restait vulnérable à la porosité du plastique. L'eau s'infiltrant facilement dans les pores des impressions ce qui au fur et mesure des essais détériorait celle-ci.
- Rigidité insuffisante : la liaison entre le tube central et les structures latérales (accueillant les moteurs) présentait un manque de robustesse, notamment sous l'effet de manipulations répétées.
- Capacité de manœuvre limitée : avec seulement 6 propulseurs, le robot ne disposait que d'un contrôle partiel sur ses degrés de liberté. L'absence de contrôle du tangage rendait la navigation sensible aux déséquilibres de poussée ou aux courants.

L'élément déclencheur d'une refonte totale fut la défaillance d'un joint sur le compartiment étanche, lors d'un test en eau réelle en fin d'année. L'eau s'est infiltrée dans le module principal, entraînant la mise hors service de plusieurs composants internes. Cet incident a non

seulement mis fin aux essais, mais a aussi révélé la nécessité de repenser l'approche de conception, tant sur le plan mécanique qu'électronique.

## II - Refonte mécanique :

### 2.1 Architecture repensée :

L'architecture mécanique du robot NEMO a connu une transformation majeure lors de la deuxième année du projet. Cette refonte a été motivée par plusieurs facteurs :

- L'intégration du contrôleur Pixhawk, imposant une répartition symétrique et dynamique des propulseurs pour permettre un contrôle dans les six degrés de liberté.
- La volonté d'améliorer la stabilité et la manœuvrabilité du robot, notamment lors de manœuvres délicates à proximité des récifs coralliens.
- Les enseignements tirés de la version précédente, notamment la difficulté à réaliser des déplacements latéraux ou des rotations précises en environnement perturbé.

Ces considérations ont mené à l'adoption d'un nouveau design à 8 propulseurs, inspiré de l'architecture dite « Heavy » utilisée par des robots professionnels tels que le BlueROV2.



Figure 2 : BlueROV2 en configuration “Heavy”

### 2.2 Configuration Heavy : définition

La configuration à 8 propulseurs repose sur une disposition en croix pour les moteurs horizontaux, inclinés à  $45^\circ$ , permettant un contrôle indépendant sur les mouvements avant/arrière, gauche/droite et rotation sur l'axe vertical.

Les quatre moteurs restants sont placés verticalement, deux à l'avant et deux à l'arrière, et assurent les mouvements en plongée/remontée ainsi que le contrôle du tangage et du roulis.

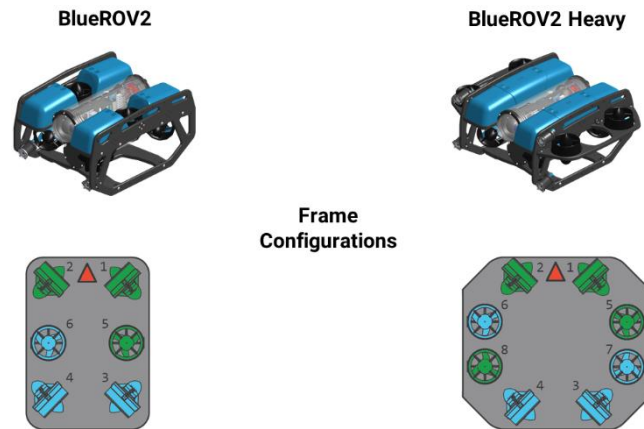


Figure 3 : Comparaison des configurations.

## 2.3. Contraintes de conception et intégration

Le passage à une architecture à huit propulseurs a nécessité une révision en profondeur du design structurel de NEMO. Afin de supporter la charge supplémentaire induite par les moteurs "Heavy" et de garantir une stabilité mécanique en immersion, le châssis a été redimensionné et consolidé.

La structure globale du robot a vu son volume augmenter, notamment par l'ajout de nouveaux supports moteurs, disposés latéralement pour la propulsion horizontale, et verticalement pour assurer le contrôle de l'assiette et de la plongée. Ces nouveaux modules ont été intégrés dans une logique de robustesse, tout en préservant un accès facile aux éléments internes.

### 2.3.1 Barres de renfort transversales

L'une des améliorations majeures apportées à cette nouvelle version concerne la rigidité transversale du châssis. Pour pallier les flexions et les déformations latérales observées dans la version précédente, des barres de renfort transversales ont été ajoutées, reliant les deux plaques latérales porte-moteurs. Ces barres assurent une meilleure tenue structurelle.

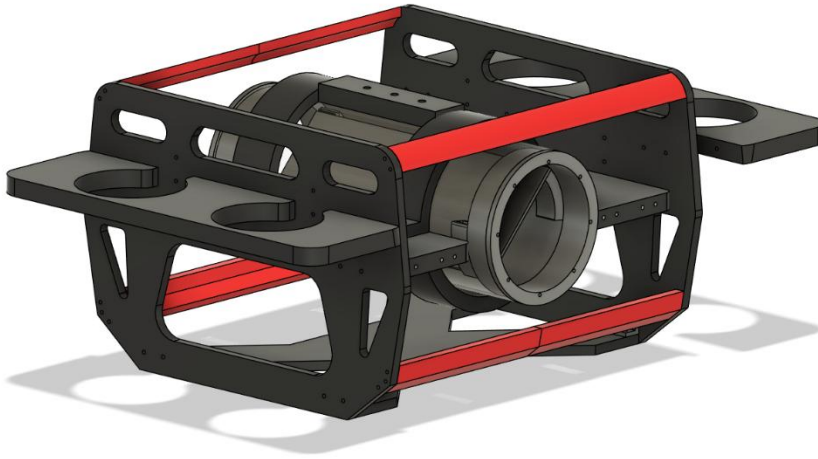


Figure 4 : Barres de renfort transversales (en rouge).

### 2.3.2 Plaque de soutien inférieure

En complément, une plaque inférieure a été intégrée à la base du robot, jouant un rôle de liaison rigide entre les deux flancs du châssis. Cette plaque inférieure, découpée en plexiglass 3 mm, contribue à la solidité d'ensemble tout en pouvant servir plus tard à supporter certains éléments modulaires (lest, capteurs externe).

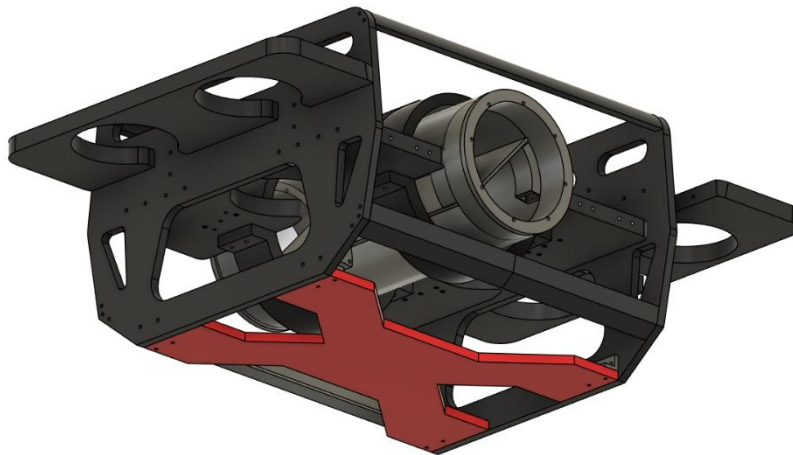


Figure 5 : Plaque de soutiens inférieure (en rouge).

### 2.3.3 Support Moteurs extérieurs

Les supports latéraux accueillent les quatre propulseurs horizontaux. Chaque support est fixé aux plaques latérales du châssis principal et est scindé en deux parties car ceux-ci étant trop long pour être imprimé en un seul bloc. Ces supports latéraux, imprimés en PETG, sont légèrement désolidarisés de la structure centrale pour minimiser la transmission des vibrations tout en assurant un bon équilibre de poussée.

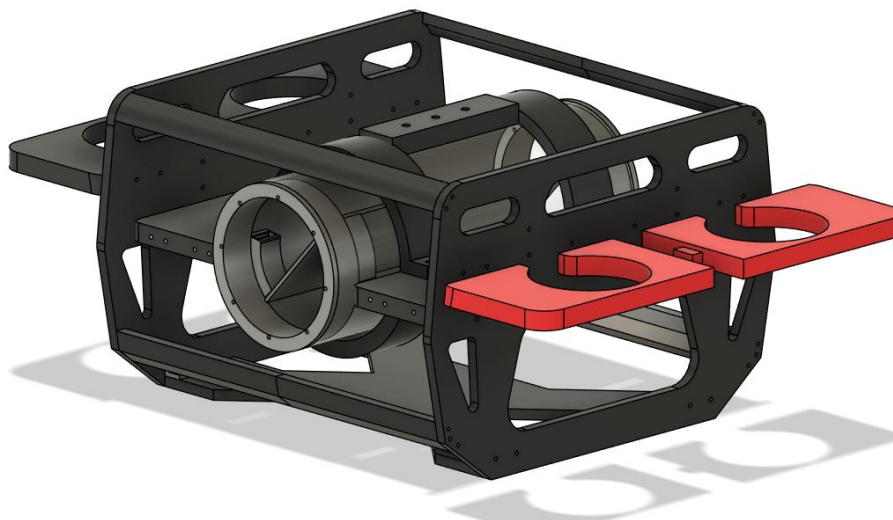


Figure 6 : Support moteurs extérieurs (en rouge).

### 2.3.4 Plaque intérieure

La plaque intérieure qui accueille l'ensemble des éléments électroniques sensibles (Pixhawk, ESC, distribution d'alimentation) a été repensée pour gagner à la fois en stabilité, en sécurité et en ergonomie. Dans la première version, cette plaque était simplement insérée en force ou vissée, ce qui rendait son retrait et sa remise en place laborieux et risqué pour les connexions internes.

Pour remédier à cela, un système de verrouillage mécanique rotatif a été conçu. Celui-ci permet à la plaque d'être insérée dans le tube via des glissières, puis verrouillée par rotation d'un mécanisme interne. Une fois tournée dans un sens, la plaque est bloquée solidement contre les parois internes du tube. En tournant dans l'autre sens, le mécanisme se désengage, permettant une extraction facile de l'ensemble.



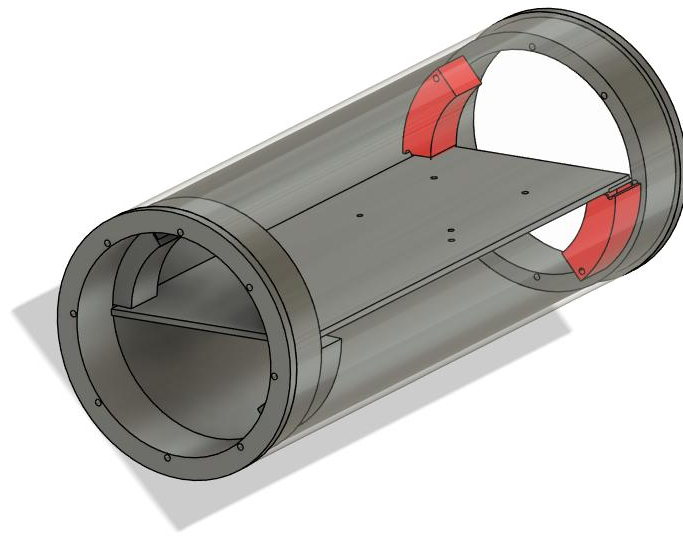


Figure 7 : Support plaque intérieure (en rouge).

## 2.4 Rendu final de la structure :

La photographie ci-dessous présente la version la plus récente du robot NEMO, intégrant les améliorations mécaniques décrites précédemment. On y distingue clairement la structure renforcée, les huit propulseurs en configuration "Heavy", ainsi que le tube central étanche contenant la plaque électronique verrouillable.



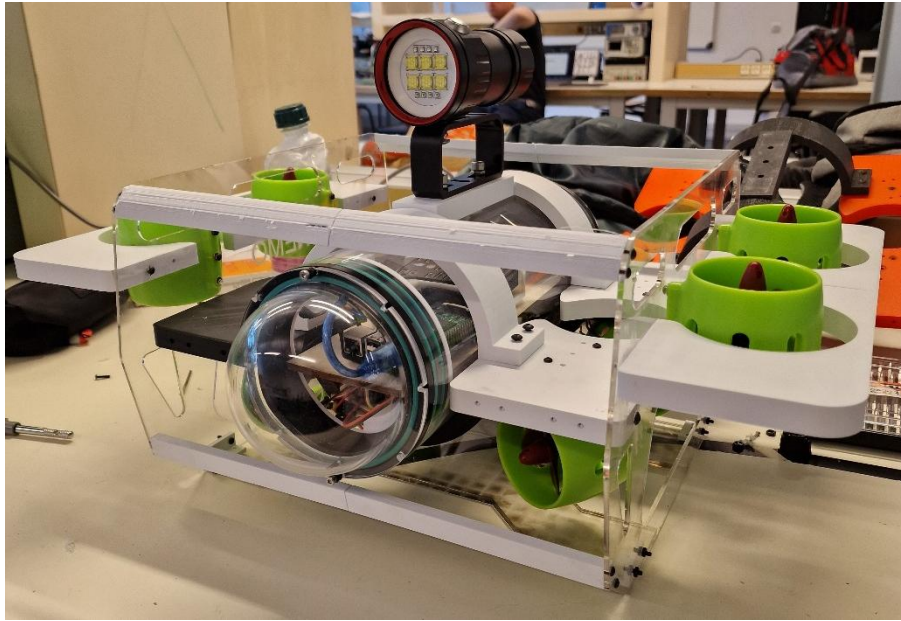


Figure 8 : NEMO

## III – Electronique embarquée :

### 3.1. Architecture générale

L'architecture électronique du robot sous-marin repose sur une approche modulaire, pensée pour faciliter le développement, la maintenance et les futurs ajouts de fonctionnalités. Elle est composée de deux unités principales : le système de contrôle embarqué, centré autour d'une Raspberry Pi 3 Model B, et le système de navigation et de commande basé sur un contrôleur Pixhawk 1. Ces deux unités sont interconnectées via une liaison série, permettant un échange de données fluide grâce au protocole MAVLink.

Le Pixhawk est chargé d'interpréter les commandes de mouvement, de contrôler les moteurs via des ESCs (Electronic Speed Controllers) et de gérer les données issues des capteurs inertiels. Il exécute le firmware ArduSub, une déclinaison d'ArduPilot adaptée aux véhicules

sous-marins. La Raspberry Pi, quant à elle, joue un rôle central dans le traitement haut niveau : elle exécute ROS 2 Humble, assure la communication avec QGroundControl, et peut héberger des algorithmes d'autonomie comme le maintien de profondeur, la navigation ou encore la détection d'obstacles.

Le schéma ci-dessous illustre l'ensemble des connexions électriques et logiques entre les composants principaux du robot :

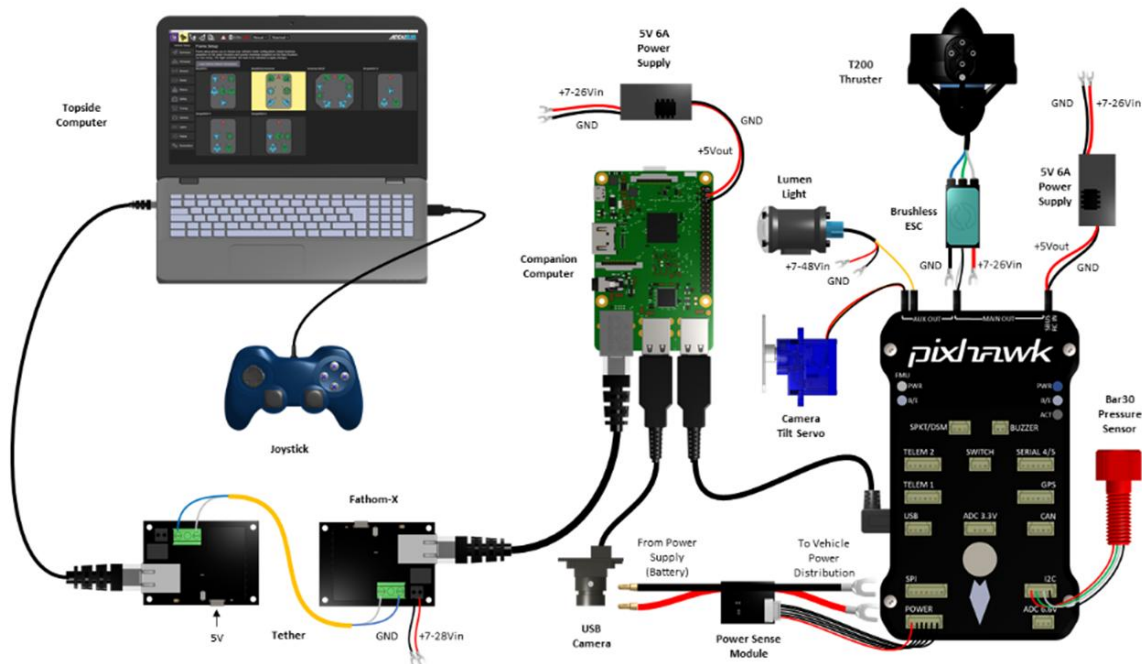


Figure 9 : schéma électrique général.

Cette architecture permet une séparation claire entre le contrôle bas niveau (assuré par le Pixhawk) et les tâches de haut niveau (traitement de données, autonomie), ce qui offre de la flexibilité pour les expérimentations logicielles tout en maintenant une fiabilité du contrôle moteur.

## 3.2. Capteurs et actionneurs

Le robot sous-marin embarque un ensemble de capteurs et d'actionneurs essentiels pour assurer sa navigation, sa stabilisation et son interaction avec l'environnement. Ces composants sont tous reliés soit au Pixhawk, soit à la Raspberry Pi, selon leur fonction et les besoins en traitement de données.

### 3.2.1. Capteurs embarqués

- IMU (Inertial Measurement Unit) : Intégrée dans le Pixhawk, elle fournit des données d'accélération, de vitesse angulaire et d'orientation. Ces informations sont cruciales pour le maintien de la stabilité et le contrôle de l'attitude du robot.

- Capteur de pression (baromètre/sonde de profondeur) : Permet de mesurer la profondeur sous-marine avec précision. Connecté au Pixhawk, il sera utilisé pour réguler l'immersion du robot.
- Caméra (optionnelle) : Branchée à la Raspberry Pi via une interface USB. Elle permet d'ajouter une dimension visuelle aux missions, pour la surveillance, la détection d'objets ou la navigation assistée. L'exploitation de la caméra reste à développer selon les capacités logicielles et les contraintes réseau.

### 3.2.2. Actionneurs : moteurs et ESCs

Le robot est propulsé par huit thrusters configurés selon un schéma de type heavy (4 pour l'horizontal, 4 pour le vertical), assurant une grande maniabilité dans les trois dimensions de l'espace sous-marin.

- Moteurs : Il s'agit de moteurs brushless spécialement conçus pour un usage subaquatique. Ils sont fixés sur la structure imprimée en 3D et sont étanches.
- ESCs (Electronic Speed Controllers) : Chaque moteur est piloté par un ESC connecté au Pixhawk. Ces contrôleurs traduisent les signaux PWM envoyés par le Pixhawk en tension adaptée pour les moteurs. Les ESCs sont calibrés pour garantir une réponse fluide et linéaire à la commande.

## IV - Architecture logicielle :

### 4.1. ArduSub sur Pixhawk :

Le Pixhawk 1 est un contrôleur de vol conçu pour exécuter des tâches temps réel liées à la stabilisation et au contrôle des actionneurs. Il embarque le firmware ArduSub, une version spécialisée d'ArduPilot pour les ROVs. Ce firmware prend en charge plusieurs fonctions critiques du robot, notamment :

- Le contrôle des moteurs (thrusters) via des signaux PWM,
- La gestion des capteurs embarqués, comme l'IMU (Inertial Measurement Unit) et le capteur de pression,
- La stabilisation de l'orientation et le maintien automatique de la profondeur,
- La réception et l'interprétation des commandes externes envoyées via le protocole MAVLink.

ArduSub fonctionne de manière autonome pour garantir la stabilité du véhicule, même en cas de coupure ou de ralentissement du système supérieur. Le Pixhawk communique avec les autres systèmes par une liaison série, permettant une intégration fluide avec la Raspberry Pi.

## 4.2. ROS2 sur Raspberry Pi 3 ModelB :

La Raspberry Pi 3 Model B, quant à elle, fonctionne sous un système d'exploitation Linux (typiquement Raspberry Pi OS ou Ubuntu) et constitue le centre de traitement de haut niveau. Elle héberge l'environnement ROS 2 Humble, qui sert de base au développement de l'intelligence embarquée du robot.

Cette unité prend en charge plusieurs rôles complémentaires :

- L'échange de données avec le Pixhawk via MAVLink (à l'aide de bibliothèques comme mavros ou pymavlink),
- Le développement de comportements autonomes à travers des nœuds ROS (ex : maintien de position, déplacement vers un point GPS, ou future implémentation de missions automatisées),
- Le traitement de flux vidéo ou d'image, si une caméra est installée,
- L'enregistrement des données pour l'analyse post-mission (logs capteurs, commandes, images).

La Raspberry Pi peut également être reliée à une station de contrôle via Ethernet ou Wi-Fi, facilitant le téléversement de scripts, la visualisation des données en temps réel, ou le contrôle manuel via QGroundControl.

Le logiciel QGroundControl reste l'interface principale pour le pilotage manuel, la configuration du système et le suivi en temps réel des données essentielles (état batterie, orientation, profondeur, etc.). Il offre également la possibilité de visualiser le retour caméra si une caméra est branchée au système.

## Conclusion :

Le développement du robot sous-marin NEMO s'inscrit dans une dynamique d'innovation continue, motivée par des enjeux environnementaux concrets et une volonté d'approcher les standards professionnels du secteur. Si la première version du robot a permis de valider certains choix techniques essentiels, les difficultés rencontrées ont été l'occasion de repenser en profondeur l'architecture du système, tant sur le plan mécanique qu'électronique et logiciel.

L'intégration d'un contrôleur Pixhawk, l'adoption de ROS 2, ainsi que la refonte complète de la structure vers une configuration inspirée du BlueROV2 marquent une étape importante vers un robot plus modulaire, plus fiable et potentiellement autonome. Toutefois, il convient de souligner que de nombreux éléments présentés dans ce rapport sont encore en phase de test, ou prévus dans la feuille de route sans avoir encore été pleinement implémentés.

Cette version du projet pose ainsi les bases d'un futur robot scientifique robuste et adaptable, capable de contribuer activement à la recherche et à la préservation des écosystèmes marins. Au-delà des aspects techniques, NEMO représente aussi une expérience formatrice en gestion de projet, en collaboration interdisciplinaire et en résolution de problèmes concrets. Les prochaines étapes consisteront à valider les fonctionnalités encore expérimentales, à renforcer l'autonomie du robot et à élargir ses capacités d'analyse environnementale.

## Bibliographie :

[BlueROV2 Build Instructions – BlueRobotics] <https://bluerobotics.com/learn/bluerov2-assembly/>

[OpenROV GitHub Repo]

<https://github.com/OpenROV/openrov-software>

[Underwater ROV Thruster Guide – BlueRobotics]

<https://bluerobotics.com/learn/bluerov2-assembly/#parts-and-tools>

[ArduSub Official Documentation]

<https://www.ardusub.com/introduction/>

[QGroundControl – Ground Station Software]

<https://docs.qgroundcontrol.com/en/>

[Pixhawk Hardware Overview – ArduPilot]

<https://ardupilot.org/copter/docs/common-pixhawk-overview.html>