



المدرسة الوطنية للذكاء الاصطناعي والرقمنة - بركان  
ÉCOLE NATIONALE DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET DU DIGITAL - BERKANE  
ΕΠΙΧΡΟΝΟ. ΜΗΤΕΙΣ. ΜΗΜΑΚ. ΜΟΘΕΙΟΝΣ ΠΟΗΟΖΕΙΟ - ΘΟΚΟ

# Rapport de stage PFA à Majal Berkane

Conception d'un véhicule maritime de surface  
sans pilote, connecté et multifonction

AbdElMalek Lamkadem

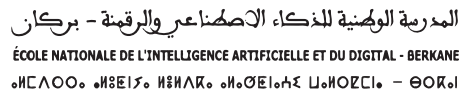
M'Hajar Soukaina

Hamdani Hajar

École Nationale de l'Intelligence Artificielle et du Digital  
Robotique & Objets Connectés

Berkane, août 2025





Berkane, août 2025



# Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à *M. Mouhammed Berroukech*, notre encadrant, pour son accompagnement constant, ses conseils avisés et son expertise précieuse tout au long de la réalisation de ce projet. Ses orientations pertinentes et ses remarques constructives ont été déterminantes pour la réussite de notre travail.

Nous remercions également l'ensemble des membres de notre équipe — *Hamdani Hajar, M'Hajar Soukaina et Abdelmalek Lamkadem* — pour leur implication, leur esprit de collaboration et leur engagement sans faille, qui ont permis d'atteindre nos objectifs dans les meilleures conditions.

Nos sincères remerciements s'adressent aussi à l'entreprise *Majale Berkane* pour nous avoir accueillis et mis à disposition les ressources, l'encadrement technique et l'environnement professionnel nécessaires à la concrétisation de ce projet.

Enfin, nous exprimons toute notre reconnaissance à nos familles et à nos amis pour leur soutien moral, leurs encouragements constants et leur patience, qui ont été pour nous une source essentielle de motivation et de persévérance.



# Abstract

This internship report presents the design and development of AquaDrone, an autonomous, connected, and multifunctional maritime surface vehicle (USV) developed during a PFA internship at Majal Berkane. The project addresses critical challenges in maritime surveillance, oceanographic data collection, and sustainable fishing assistance through innovative autonomous technology.

The research focuses on overcoming limitations of current maritime systems, including limited energy autonomy, vulnerability to marine conditions, and restricted communication capabilities. The proposed solution integrates a modular architecture combining Raspberry Pi 4 control systems, advanced environmental sensors (temperature, salinity, pH, dissolved oxygen), GPS navigation, and robust MLO5 communication modules.

Key achievements include the successful integration of multi-sensor systems, development of autonomous navigation algorithms, and validation of the system in real marine conditions. The project demonstrates the viability of autonomous solutions for maritime environments while contributing to Morocco's technological advancement in marine robotics.

The work establishes a foundation for future developments in autonomous maritime vehicles, offering potential applications in environmental monitoring, scientific research, and commercial maritime operations. This project represents a significant step toward sustainable and efficient maritime operations in the Mediterranean region.

**Keywords :** Autonomous Maritime Vehicle, USV, Marine Robotics, Environmental Monitoring, IoT, Raspberry Pi, Oceanographic Sensors, Autonomous Navigation, Marine Communication Systems.





# Résumé

Ce rapport de stage présente la conception et le développement d'AquaDrone, un véhicule maritime de surface autonome, connecté et multifonctionnel (USV) développé lors d'un stage PFA au sein de Majal Berkane. Le projet aborde les défis critiques de la surveillance maritime, de la collecte de données océanographiques et de l'assistance à la pêche durable grâce à une technologie autonome innovante.

La recherche se concentre sur le dépassement des limitations des systèmes maritimes actuels, incluant l'autonomie énergétique limitée, la vulnérabilité aux conditions marines et les capacités de communication restreintes. La solution proposée intègre une architecture modulaire combinant des systèmes de contrôle Raspberry Pi 4, des capteurs environnementaux avancés (température, salinité, pH, oxygène dissous), la navigation GPS et des modules de communication MLO5 robustes.

Les réalisations principales incluent l'intégration réussie de systèmes multi-capteurs, le développement d'algorithmes de navigation autonome et la validation du système en conditions marines réelles. Le projet démontre la viabilité des solutions autonomes pour les environnements maritimes tout en contribuant à l'avancement technologique du Maroc dans le domaine de la robotique marine.

Le travail établit une base pour les développements futurs de véhicules maritimes autonomes, offrant des applications potentielles dans la surveillance environnementale, la recherche scientifique et les opérations maritimes commerciales. Ce projet représente une étape significative vers des opérations maritimes durables et efficaces dans la région méditerranéenne.

**Keywords :** Véhicule Maritime Autonome, USV, Robotique Marine, Surveillance Environnementale, IoT, Raspberry Pi, Capteurs Océanographiques, Navigation Autonome, Systèmes de Communication Marine.



# Déclaration sur l'Utilisation de l'Intelligence Artificielle

## DÉCLARATION SUR L'UTILISATION DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Nous, équipe de stagiaires au sein de *Majale Berkane*, déclarons que nous avons utilisé des outils d'intelligence artificielle (IA) dans la rédaction de ce rapport de stage.

### Outils d'IA utilisés :

- **ChatGPT, DeepSeek** : Assistance à la rédaction et à la formulation
- **GitHub Copilot, Cursor** : Aide au développement de  $\text{\LaTeX}$
- **Claude, Gemini** : Révision et amélioration du contenu

### Nature de l'utilisation :

- Assistance à la rédaction et à la formulation
- Aide à la structuration du contenu
- Vérification grammaticale et orthographique
- Génération d'idées et suggestions d'amélioration
- Aide au développement de code et scripts

### Engagement de l'équipe :

- Tous les contenus générés ont été relus, validés et adaptés par notre équipe
- La responsabilité du contenu final reste entièrement la nôtre
- Les outils d'IA ont été utilisés comme support, non comme remplacement de notre réflexion collective
- Toutes les sources et références ont été vérifiées et citées selon les normes académiques



# Table des matières

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| <i>Table des figures</i>  | xv    |
| <i>Liste des tableaux</i> | xvii  |
| <i>Glossaire</i>          | xix   |
| <i>Acronymes</i>          | xxi   |
| <i>Symboles</i>           | xxiii |

|   |          |
|---|----------|
| <b>1 Introduction générale</b>  | <b>1</b> |
| 1.1 Contexte du projet et importance dans le domaine maritime . . . . . | 1        |
| 1.2 Problématique générale . . . . .                                    | 1        |
| 1.3 Objectifs globaux . . . . .   | 2        |
| <b>2 Problématique</b>  | <b>3</b> |
| 2.1 Limites des systèmes nautiques actuels . . . . .                    | 3        |
| 2.1.1 Limitations technologiques . . . . .                              | 3        |
| 2.1.2 Limitations opérationnelles . . . . .                             | 3        |
| 2.2 Enjeux de la surveillance maritime et de la télédétection . . . . . | 4        |
| 2.2.1 Enjeux environnementaux . . . . .                                 | 4        |
| 2.2.2 Enjeux technologiques . . . . .                                   | 4        |
| 2.3 Besoins spécifiques d'un véhicule autonome multifonction . . . . .  | 4        |
| 2.3.1 Besoins fonctionnels . . . . .                                    | 4        |
| 2.3.2 Besoins techniques . . . . .                                      | 4        |
| 2.3.3 Besoins opérationnels . . . . .                                   | 5        |
| <b>3 Présentation de l'organisme d'accueil</b>                          | <b>6</b> |
| 3.1 Introduction . . . . .  | 6        |
| 3.2 Historique et missions de Majal Berkane . . . . .                   | 6        |
| 3.2.1 Missions principales . . . . .                                    | 6        |
| 3.3 Organisation interne et structure hiérarchique . . . . .            | 7        |
| 3.3.1 Structure organisationnelle . . . . .                             | 7        |
| 3.3.2 Équipe de direction . . . . .                                     | 7        |
| 3.4 Domaines d'activités . . . . .                                      | 7        |
| 3.4.1 Technologies maritimes . . . . .                                  | 7        |
| 3.4.2 Intelligence artificielle et robotique . . . . .                  | 7        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 3.4.3    | Énergies renouvelables et durabilité . . . . .                  | 7         |
| 3.5      | Rôle et importance dans la région . . . . .                     | 8         |
| 3.5.1    | Impact économique . . . . .                                     | 8         |
| 3.5.2    | Impact social et environnemental . . . . .                      | 8         |
| 3.5.3    | Positionnement international . . . . .                          | 8         |
| 3.6      | Conclusion . . . . .  | 8         |
| <b>4</b> | <b>Étude préliminaire et analyse des besoins</b>                | <b>9</b>  |
| 4.1      | Introduction . . . . .  | 9         |
| 4.2      | Généralités sur les USV (Unmanned Surface Vehicles) . . . . .   | 9         |
| 4.2.1    | Définition et classification . . . . .                          | 9         |
| 4.2.2    | Avantages des USV . . . . .                                     | 9         |
| 4.3      | Choix de l'architecture catamaran . . . . .                     | 10        |
| 4.3.1    | Analyse comparative : Catamaran vs Monocoque . . . . .          | 10        |
| 4.3.2    | Justification technique du choix . . . . .                      | 10        |
| 4.3.3    | Considérations de conception . . . . .                          | 11        |
| 4.4      | Contexte du projet AquaDrone . . . . .                          | 11        |
| 4.4.1    | Origine et motivation . . . . .                                 | 12        |
| 4.4.2    | Partenaires et collaborations . . . . .                         | 12        |
| 4.5      | Objectifs spécifiques du projet . . . . .                       | 12        |
| 4.5.1    | Objectifs techniques . . . . .                                  | 13        |
| 4.5.2    | Objectifs fonctionnels . . . . .                                | 13        |
| 4.6      | Analyse des besoins fonctionnels et techniques . . . . .        | 14        |
| 4.6.1    | Missions prévues . . . . .                                      | 14        |
| 4.6.2    | Contraintes identifiées . . . . .                               | 14        |
| 4.7      | Conclusion du chapitre . . . . .                                | 15        |
| <b>5</b> | <b>Architecture générale et composants</b>                      | <b>16</b> |
| 5.1      | Introduction . . . . .  | 16        |
| 5.2      | Architecture fonctionnelle du système . . . . .                 | 16        |
| 5.2.1    | Schéma blocs . . . . .  | 16        |
| 5.2.2    | Organigrammes fonctionnels . . . . .                            | 17        |
| 5.3      | Architecture technique . . . . .                                | 17        |
| 5.3.1    | Répartition des modules . . . . .                               | 17        |
| 5.4      | Composants matériels . . . . .                                  | 17        |
| 5.4.1    | Tableau complet des capteurs . . . . .                          | 18        |
| 5.4.2    | Choix du microcontrôleur (Raspberry Pi 4) . . . . .             | 18        |
| 5.4.3    | Intégration du module MLO5 et protocole réseau . . . . .        | 18        |
| 5.5      | Outils logiciels et bibliothèques . . . . .                     | 18        |
| 5.5.1    | CAO, simulation, traitement de données, communication . . . . . | 19        |
| 5.6      | Schéma global du système . . . . .                              | 19        |
| 5.6.1    | Interfaces et connecteurs . . . . .                             | 19        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 5.6.2    | Flux de données . . . . .  | 19        |
| 5.7      | Conclusion . . . . .   | 20        |
| <b>6</b> | <b>Fonctionnement détaillé du système</b>                            | <b>21</b> |
| 6.1      | Introduction . . . . .   | 21        |
| 6.2      | Acquisition des données capteurs . . . . .                           | 21        |
| 6.2.1    | Interfaces de communication . . . . .                                | 21        |
| 6.3      | Transmission des données vers la station distante via MLO5 . . . . . | 22        |
| 6.3.1    | Protocoles de communication . . . . .                                | 23        |
| 6.3.2    | Sécurité et fiabilité en environnement maritime . . . . .            | 23        |
| 6.4      | Gestion et traitement des données . . . . .                          | 24        |
| 6.4.1    | Collecte et validation . . . . .                                     | 24        |
| 6.4.2    | Traitement et analyse . . . . .                                      | 24        |
| 6.5      | Conception 3D et intégration mécanique avec SolidWorks . . . . .     | 24        |
| 6.5.1    | Modélisation 3D du véhicule et des modules . . . . .                 | 24        |
| 6.5.2    | Intégration des capteurs et actionneurs . . . . .                    | 24        |
| 6.5.3    | Simulation hydrodynamique et tests de stabilité . . . . .            | 25        |
| 6.6      | Conclusion . . . . .   | 25        |
| <b>7</b> | <b>Conception 3D et modélisation</b>                                 | <b>26</b> |
| 7.1      | Introduction . . . . .   | 26        |
| 7.2      | Architecture générale de l'assemblage . . . . .                      | 26        |
| 7.2.1    | Assemblage principal . . . . .                                       | 26        |
| 7.2.2    | Sous-assemblages . . . . .   | 28        |
| 7.3      | Composants principaux et leur intégration . . . . .                  | 29        |
| 7.3.1    | Structure de base . . . . .  | 29        |
| 7.3.2    | Systèmes de capteurs et instrumentation . . . . .                    | 31        |
| 7.4      | Optimisation de la conception . . . . .                              | 32        |
| 7.4.1    | Considérations hydrodynamiques . . . . .                             | 32        |
| 7.4.2    | Intégration mécanique . . . . .                                      | 32        |
| 7.5      | Simulation et validation . . . . .                                   | 33        |
| 7.5.1    | Simulations de stabilité . . . . .                                   | 33        |
| 7.5.2    | Analyses structurales . . . . .                                      | 33        |
| 7.6      | Préparation pour la fabrication . . . . .                            | 35        |
| 7.6.1    | Plans de fabrication . . . . .                                       | 35        |
| 7.6.2    | Instructions d'assemblage . . . . .                                  | 35        |
| 7.7      | Conclusion . . . . .   | 35        |
| <b>8</b> | <b>Assemblage, tests et optimisation</b>                             | <b>39</b> |
| 8.1      | Introduction . . . . .   | 39        |
| 8.2      | Étude de la motorisation . . . . .                                   | 39        |
| 8.2.1    | Choix des moteurs adaptés à l'environnement marin . . . . .          | 39        |
| 8.2.2    | Calcul de poussée et intégration . . . . .                           | 40        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 8.3      | Dimensionnement énergétique . . . . .                   | 40        |
| 8.3.1    | Calcul d'autonomie . . . . .                            | 40        |
| 8.3.2    | Batteries et alimentation solaire . . . . .             | 41        |
| 8.4      | Scénarios et protocoles de test . . . . .               | 41        |
| 8.4.1    | Tests en laboratoire . . . . .                          | 41        |
| 8.4.2    | Tests en conditions réelles . . . . .                   | 41        |
| 8.5      | Résultats obtenus et analyse des performances . . . . . | 42        |
| 8.5.1    | Performances de navigation . . . . .                    | 42        |
| 8.5.2    | Performances des capteurs . . . . .                     | 42        |
| 8.5.3    | Performances de communication . . . . .                 | 42        |
| 8.6      | Problèmes rencontrés (matériels et logiciels) . . . . . | 42        |
| 8.6.1    | Problèmes matériels . . . . .                           | 42        |
| 8.6.2    | Problèmes logiciels . . . . .                           | 43        |
| 8.7      | Solutions mises en place . . . . .                      | 43        |
| 8.7.1    | Améliorations matérielles . . . . .                     | 43        |
| 8.7.2    | Améliorations logicielles . . . . .                     | 43        |
| 8.7.3    | Procédures et maintenance . . . . .                     | 43        |
| 8.8      | Conclusion . . . . .                                    | 43        |
| <b>9</b> | <b>Conclusion générale</b> . . . . .                    | <b>45</b> |
| 9.1      | Récapitulatif des résultats . . . . .                   | 45        |
| 9.1.1    | Objectifs atteints . . . . .                            | 45        |
| 9.1.2    | Innovations techniques . . . . .                        | 45        |
| 9.1.3    | Contributions au domaine . . . . .                      | 46        |
| 9.2      | Limites identifiées . . . . .                           | 46        |
| 9.2.1    | Limitations techniques . . . . .                        | 46        |
| 9.2.2    | Limitations opérationnelles . . . . .                   | 46        |
| 9.3      | Perspectives d'amélioration . . . . .                   | 47        |
| 9.3.1    | Améliorations techniques . . . . .                      | 47        |
| 9.3.2    | Améliorations logicielles . . . . .                     | 47        |
| 9.3.3    | Évolutions fonctionnelles . . . . .                     | 48        |
| 9.4      | Impact et retombées . . . . .                           | 48        |
| 9.4.1    | Impact économique . . . . .                             | 48        |
| 9.4.2    | Impact social et environnemental . . . . .              | 48        |
| 9.4.3    | Impact scientifique et technologique . . . . .          | 48        |
| 9.5      | Conclusion finale . . . . .                             | 49        |
| 9.5.1    | Bilan personnel . . . . .                               | 49        |
| 9.5.2    | Contribution au projet . . . . .                        | 49        |
| 9.5.3    | Perspectives futures . . . . .                          | 49        |

## Annexes Techniques



|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>A</b> | <b>Dessins Techniques et Plans de Conception</b> | <b>54</b> |
| A.1      | Plan d'ensemble du véhicule . . . . .            | 54        |
| A.2      | Vues détaillées des composants . . . . .         | 54        |
| A.2.1    | Coque et structure . . . . .                     | 54        |
| A.2.2    | Système de propulsion . . . . .                  | 54        |
| A.3      | Spécifications dimensionnelles . . . . .         | 55        |
| A.4      | Plans d'assemblage . . . . .                     | 55        |
| A.4.1    | Assemblage principal . . . . .                   | 55        |
| A.4.2    | Installation des capteurs . . . . .              | 55        |
| A.5      | Notes techniques . . . . .                       | 55        |
| A.6      | Liste des pièces . . . . .                       | 55        |
| <b>B</b> | <b>Schémas Électriques et Connexions</b>         | <b>56</b> |
| B.1      | Schéma électrique général . . . . .              | 56        |
| B.2      | Distribution d'énergie . . . . .                 | 56        |
| B.2.1    | Système de batteries . . . . .                   | 56        |
| B.2.2    | Chargement solaire . . . . .                     | 56        |
| B.3      | Connexions des capteurs . . . . .                | 57        |
| B.3.1    | Interface I2C . . . . .                          | 57        |
| B.3.2    | Interface 1-Wire . . . . .                       | 57        |
| B.4      | Contrôle des moteurs . . . . .                   | 57        |
| B.4.1    | Contrôleurs de moteurs . . . . .                 | 57        |
| B.4.2    | Interface PWM . . . . .                          | 57        |
| B.5      | Communication et réseau . . . . .                | 57        |
| B.5.1    | Module MLO5 . . . . .                            | 57        |
| B.5.2    | Interface Ethernet et Wi-Fi . . . . .            | 57        |
| B.6      | Spécifications techniques . . . . .              | 57        |
| B.6.1    | Caractéristiques électriques . . . . .           | 57        |
| B.6.2    | Protection et sécurité . . . . .                 | 57        |
| B.7      | Liste des composants électroniques . . . . .     | 58        |
| B.8      | Notes d'installation . . . . .                   | 58        |



# Table des figures

|      |  |    |
|------|--|----|
| 4.1  | Comparaison des architectures catamaran et monocoque pour l'AquaDrone        | 12 |
| 4.2  | Principes de conception de l'architecture catamaran de l'AquaDrone . . . . . | 13 |
| 7.1  | Vue d'ensemble de l'assemblage principal . . . . .                           | 27 |
| 7.2  | Vues des sous-assemblages de coque et de structure. . . . .                  | 28 |
| 7.3  | Système de propulsion . . . . .  | 29 |
| 7.4  | Design des coques . . . . .  | 30 |
| 7.5  | Détail du pont de liaison . . . . .  | 31 |
| 7.6  | Intégration des systèmes de capteurs et de navigation. . . . .               | 32 |
| 7.7  | Équipements scientifiques . . . . .  | 33 |
| 7.8  | Analyse hydrodynamique . . . . .   | 34 |
| 7.9  | Intégration mécanique . . . . .  | 35 |
| 7.10 | Simulation de stabilité . . . . .  | 36 |
| 7.11 | Analyse structurale . . . . .  | 37 |
| 7.12 | Séquence d'assemblage . . . . .  | 38 |
| A.1  | Plan d'ensemble du véhicule AquaDrone - Vue de dessus . . . . .              | 54 |
| A.2  | Détails de la coque et de la structure . . . . .                             | 54 |
| A.3  | Système de propulsion et de direction . . . . .                              | 54 |
| A.4  | Plan d'assemblage principal du véhicule . . . . .                            | 55 |
| A.5  | Plan d'installation des capteurs et équipements . . . . .                    | 55 |
| B.1  | Schéma électrique général du système AquaDrone . . . . .                     | 56 |
| B.2  | Système de batteries et distribution d'énergie . . . . .                     | 56 |
| B.3  | Système de chargement solaire et régulation . . . . .                        | 56 |
| B.4  | Connexions I2C des capteurs environnementaux . . . . .                       | 57 |
| B.5  | Connexions 1-Wire des capteurs de température . . . . .                      | 57 |
| B.6  | Schéma de contrôle des moteurs de propulsion . . . . .                       | 57 |
| B.7  | Interface PWM pour le contrôle de vitesse . . . . .                          | 57 |
| B.8  | Connexions du module de communication MLO5 . . . . .                         | 57 |
| B.9  | Interfaces réseau Ethernet et Wi-Fi . . . . .                                | 57 |



# Liste des tableaux

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 5.1 | Spécifications des capteurs intégrés dans le système AquaDrone. . . . . | 18 |
| A.1 | Caractéristiques dimensionnelles du véhicule . . . . .                  | 55 |
| A.2 | Nomenclature des pièces principales . . . . .                           | 55 |
| B.1 | Spécifications électriques du système . . . . .                         | 58 |
| B.2 | Nomenclature des composants électroniques . . . . .                     | 58 |



# Glossaire

|                     |  |
|---------------------|--|
| <b>Architecture</b> | The art and science of designing and constructing buildings, structures, and systems. In software and systems engineering, it refers to the fundamental organization of a system embodied in its components, their relationships to each other and the environment, and the principles governing its design and evolution. (p. 2, 5) |
| <b>Assemblage</b>   | The process of joining or fitting together different components or parts to create a complete system or structure. In engineering, this involves the systematic combination of individual elements to form a functional whole. (p. 2)  |
| <b>Conception</b>   | The process of developing and planning the design of a system, product, or structure. It involves creative thinking, problem analysis, and the formulation of design solutions. (p. 1, 3)  |
| <b>Integration</b>  | The process of combining different subsystems or components into a unified system that functions as a whole. It involves ensuring compatibility, communication, and coordination between various parts. (p. 1)   |
| <b>Maintenance</b>  | The process of preserving and keeping a system, machine, or structure in good working condition. It includes preventive measures, repairs, and updates to ensure continued functionality. (p. 3, 5)  |
| <b>Optimisation</b> | The process of making something as effective, functional, or useful as possible. In engineering, this involves finding the best solution within given constraints. (p. 4)  |
| <b>Validation</b>   | The process of evaluating a system or component during or at the end of the development process to determine whether it satisfies the specified requirements and meets user needs. (p. 4)  |





# Acronymes

|             |  |
|-------------|--|
| <b>3D</b>   | Three-Dimensional. (p. 26)                           |
| <b>GPS</b>  | Global Positioning System. (p. 17, 18)               |
| <b>I2C</b>  | Inter-Integrated Circuit. (p. 18)                    |
| <b>UART</b> | Universal Asynchronous Receiver-Transmitter. (p. 18) |



# Symboles

- $\alpha$  Angular position of a rotating object, in radians. (p. 26)
- $\beta$  Rate of change of angular position, or angular velocity, in radians per second.  
(p. 28)
- $\omega$  Angular frequency in radians per second. (p. 28)
- $\tau$  Torque or time constant in engineering and physics. (p. 28)



# 1

## Introduction générale

### 1.1 Contexte du projet et importance dans le domaine maritime

Le domaine maritime représente un enjeu crucial pour l'économie mondiale, la sécurité et la préservation de l'environnement. La surveillance des océans, la gestion des ressources halieutiques et la protection des écosystèmes marins nécessitent des solutions innovantes et adaptées aux défis spécifiques de l'environnement marin.

Les technologies autonomes et la robotique maritime émergent comme des solutions prometteuses pour répondre à ces défis. Les véhicules de surface sans équipage (USV - Unmanned Surface Vehicles) offrent de nouvelles possibilités pour la surveillance maritime, la collecte de données océanographiques et l'assistance à la pêche, tout en réduisant les risques pour les équipages humains.

#### Note

Cette introduction présente le cadre général du projet AquaDrone, un véhicule autonome multifonction développé pour répondre aux défis spécifiques de l'environnement maritime marocain et méditerranéen.

### 1.2 Problématique générale

Malgré les avancées technologiques récentes, les systèmes nautiques actuels présentent plusieurs limitations qui freinent leur adoption généralisée et leur efficacité opérationnelle. Les défis incluent la robustesse face aux conditions marines difficiles, l'autonomie énergétique limitée, la fiabilité des communications en mer et l'**Intégration** harmonieuse de multiples capteurs et systèmes.

La complexité de l'environnement maritime - caractérisé par des conditions météorologiques variables, la corrosion saline, et les contraintes de navigation - nécessite des solutions techniques robustes et adaptées. La **Conception** de ces systèmes doit prendre

en compte ces contraintes spécifiques.

### 1.3 Objectifs globaux

Ce projet vise à développer un véhicule autonome multifonction capable de :

- Assurer la surveillance maritime continue et autonome
- Collecter des données océanographiques et environnementales
- Assister les activités de pêche de manière éthique et durable
- Contribuer à la recherche scientifique en milieu marin
- Démontrer la viabilité des solutions autonomes en environnement maritime

La réalisation de ces objectifs contribuera à l'émergence de nouvelles approches pour la gestion et la protection des espaces maritimes, tout en ouvrant la voie à des applications commerciales et scientifiques innovantes. L'**Architecture** technique de ce système sera détaillée dans **chapitre 5**, et le processus d'**Assemblage** et de tests sera présenté dans **chapitre 8**.

#### Tip

Ces objectifs ambitieux nécessitent une approche multidisciplinaire combinant expertise en robotique, en océanographie, en électronique et en mécanique marine.

# 2

## Problématique

### 2.1 Limites des systèmes nautiques actuels

Les systèmes nautiques traditionnels et même les solutions semi-autonomes actuelles présentent plusieurs limitations significatives qui limitent leur efficacité et leur adoption dans le domaine maritime :

#### Note

L'identification de ces limitations constitue la base de la **Conception** du système AquaDrone, permettant de développer des solutions innovantes répondant aux défis spécifiques de l'environnement maritime.

#### 2.1.1 Limitations technologiques

- **Autonomie énergétique limitée** : La plupart des systèmes actuels nécessitent des recharges fréquentes ou des interventions humaines
- **Fragilité face aux conditions marines** : Résistance insuffisante à la corrosion saline, aux vagues et aux conditions météorologiques extrêmes
- **Capacités de communication restreintes** : Portée limitée et fiabilité réduite en environnement maritime

#### 2.1.2 Limitations opérationnelles

- **Coûts d'exploitation élevés** : **Maintenance** fréquente et nécessité d'équipages qualifiés
- **Flexibilité limitée** : Difficulté d'adaptation aux missions variées et aux conditions changeantes

- **Intégration complexe** : Problèmes de compatibilité entre différents systèmes et capteurs

## 2.2 Enjeux de la surveillance maritime et de la télédétection

La surveillance maritime et la télédétection océanographique présentent des défis spécifiques qui nécessitent des solutions innovantes :

### 2.2.1 Enjeux environnementaux

- **Surveillance continue** : Nécessité de collecter des données 24h/24 et 7j/7 pour comprendre les dynamiques océaniques
- **Couverture géographique étendue** : Besoin de surveiller de vastes zones maritimes avec une résolution temporelle et spatiale élevée
- **Préservation des écosystèmes** : Équilibre entre collecte de données et minimisation de l'impact environnemental

### 2.2.2 Enjeux technologiques

- **Fiabilité des capteurs** : Maintien de la précision des mesures dans des conditions marines difficiles
- **Traitement des données** : Gestion de grands volumes de données en temps réel
- **Calibration et Validation** : Maintien de la qualité des données sur le long terme

## 2.3 Besoins spécifiques d'un véhicule autonome multifonction

Le développement d'un véhicule autonome multifonction pour l'environnement maritime répond à des besoins spécifiques et critiques :

### 2.3.1 Besoins fonctionnels

- **Polyvalence** : Capacité d'adaptation à différentes missions (surveillance, pêche assistée, télédétection)
- **Autonomie décisionnelle** : Capacité de prise de décision en temps réel face aux conditions changeantes
- **Coopération multi-véhicules** : Possibilité de travailler en flotte pour des missions complexes

### 2.3.2 Besoins techniques

- **Robustesse** : Résistance aux conditions marines extrêmes et durabilité à long terme
- **Efficacité énergétique** : **Optimisation** de la consommation pour maximiser l'autonomie



- **Modularité** : **Architecture** permettant l'adaptation et l'évolution selon les besoins
- **Sécurité** : Systèmes de sécurité et de récupération en cas de défaillance

### 2.3.3 Besoins opérationnels

- **Facilité d'utilisation** : Interface simple pour les opérateurs non-experts
- **Maintenance préventive** : Capacité de diagnostic et d'alerte précoce
- **Conformité réglementaire** : Respect des normes maritimes et environnementales

La réponse à ces besoins nécessite une approche intégrée combinant expertise en robotique, en océanographie, en électronique et en mécanique marine, dans le cadre d'un projet innovant et ambitieux. L'**Architecture** technique détaillée est présentée dans **chapitre 5**.

# 3

## Présentation de l'organisme d'accueil

### 3.1 Introduction

Ce chapitre présente l'organisme d'accueil Majal Berkane, partenaire de ce stage et acteur majeur dans le développement technologique et maritime de la région de l'Orient au Maroc. La compréhension de son contexte, de ses missions et de son organisation est essentielle pour appréhender le cadre dans lequel s'inscrit le projet AquaDrone.

### 3.2 Historique et missions de Majal Berkane

Majal Berkane est une organisation innovante née de la vision de développer des solutions technologiques avancées pour répondre aux défis spécifiques du Maroc et de la région méditerranéenne. Fondée avec l'ambition de devenir un centre d'excellence en matière de recherche et développement technologique, Majal Berkane s'est spécialisée dans plusieurs domaines clés.

#### 3.2.1 Missions principales

- **Innovation technologique** : Développement de solutions innovantes pour l'industrie maritime et la surveillance environnementale
- **Recherche et développement** : Conduite de projets de recherche appliquée en collaboration avec des institutions académiques et industrielles
- **Formation et transfert de compétences** : Contribution au développement des compétences technologiques locales
- **Coopération internationale** : Établissement de partenariats stratégiques avec des acteurs internationaux du domaine maritime

### 3.3 Organisation interne et structure hiérarchique

Majal Berkane dispose d'une organisation structurée et hiérarchisée, optimisée pour la conduite de projets innovants et complexes.

#### 3.3.1 Structure organisationnelle

L'organisation s'articule autour de plusieurs départements spécialisés :

- **Département Recherche et Développement** : Conception et développement de nouvelles technologies
- **Département Technique** : Implémentation et test des solutions développées
- **Département Projets** : Gestion et coordination des projets internes et externes
- **Département Qualité** : Assurance qualité et conformité aux standards internationaux

#### 3.3.2 Équipe de direction

L'équipe de direction de Majal Berkane combine expertise technique et vision stratégique, garantissant l'alignement des projets avec les objectifs organisationnels et les besoins du marché.

### 3.4 Domaines d'activités

Majal Berkane opère dans plusieurs domaines d'activités stratégiques, reflétant la diversité de ses compétences et la transversalité de ses solutions.

#### 3.4.1 Technologies maritimes

- Développement de systèmes de surveillance maritime
- Conception de véhicules autonomes pour applications marines
- Intégration de capteurs et systèmes de communication en environnement marin

#### 3.4.2 Intelligence artificielle et robotique

- Développement d'algorithmes d'intelligence artificielle pour la navigation autonome
- Conception de systèmes robotiques adaptés aux conditions marines
- Intégration de technologies de vision par ordinateur et de traitement d'images

#### 3.4.3 Énergies renouvelables et durabilité

- Développement de solutions énergétiques durables pour applications marines
- Intégration de systèmes d'énergie solaire et éolienne
- Optimisation énergétique des systèmes embarqués

### 3.5 Rôle et importance dans la région

Majal Berkane joue un rôle stratégique dans le développement technologique et économique de la région de l'Oriental et du Maroc dans son ensemble.

#### 3.5.1 Impact économique

- Création d'emplois qualifiés dans le domaine technologique
- Attraction d'investissements étrangers dans le secteur maritime
- Développement d'un écosystème d'innovation local

#### 3.5.2 Impact social et environnemental

- Contribution à la formation de la relève technologique marocaine
- Développement de solutions durables pour la protection de l'environnement marin
- Renforcement de la position du Maroc dans le domaine des technologies maritimes

#### 3.5.3 Positionnement international

Majal Berkane s'est positionnée comme un partenaire de choix pour les collaborations internationales, contribuant à la visibilité du Maroc dans le domaine des technologies maritimes et de la robotique autonome.

### 3.6 Conclusion

Majal Berkane représente un partenaire stratégique de premier plan pour ce stage, offrant un environnement propice à l'innovation et au développement de solutions technologiques avancées. Son expertise dans le domaine maritime, sa structure organisationnelle efficace et sa vision stratégique en font un acteur clé du développement technologique au Maroc.

La collaboration avec Majal Berkane dans le cadre du projet AquaDrone s'inscrit parfaitement dans cette vision, contribuant au développement de solutions innovantes pour la surveillance maritime et la télédétection océanographique.

# 4

## Étude préliminaire et analyse des besoins

### 4.1 Introduction

Ce chapitre présente l'étude préliminaire menée pour définir le cadre du projet Aqua-Drone et analyser les besoins spécifiques associés au développement d'un véhicule autonome multifonction pour applications marines. Cette analyse constitue la base de la conception et de l'implémentation du système.

### 4.2 Généralités sur les USV (Unmanned Surface Vehicles)

Les véhicules de surface sans équipage (USV) représentent une catégorie émergente de systèmes robotiques maritimes, offrant de nouvelles possibilités pour la surveillance, la recherche et les applications commerciales en mer.

#### 4.2.1 Définition et classification

Un USV est un véhicule maritime autonome ou télécommandé, capable de naviguer à la surface de l'eau sans équipage humain à bord. Ces systèmes peuvent être classés selon plusieurs critères :

- **Niveau d'autonomie** : Télécommandé, semi-autonome, entièrement autonome
- **Taille et capacité** : Micro-USV (< 1m), mini-USV (1-3m), USV standard (3-10m), gros USV (> 10m)
- **Applications** : Surveillance, recherche, pêche, transport, sécurité

#### 4.2.2 Avantages des USV

- **Sécurité** : Élimination des risques pour les équipages humains
- **Efficacité** : Opération continue 24h/24 sans fatigue

- **Coût** : Réduction des coûts opérationnels à long terme
- **Flexibilité** : Adaptation rapide aux missions et conditions changeantes

### 4.3 Choix de l'architecture catamaran

La conception de l'AquaDrone repose sur l'architecture catamaran, un choix stratégique basé sur une analyse comparative approfondie avec les alternatives monocoques traditionnelles.

#### 4.3.1 Analyse comparative : Catamaran vs Monocoque

L'évaluation des différentes architectures de coque a été menée en considérant les exigences spécifiques du projet AquaDrone, notamment la stabilité, l'efficacité énergétique et la capacité d'emport.

##### Avantages du catamaran

- **Stabilité supérieure** : La largeur entre les coques offre une stabilité transversale exceptionnelle, réduisant significativement le roulis et le tangage
- **Efficacité hydrodynamique** : Réduction de la résistance à l'avancement grâce à la séparation des coques et à la diminution du volume immergé
- **Capacité d'emport** : Espace disponible entre les coques pour l'installation d'équipements et de capteurs
- **Manœuvrabilité** : Contrôle directionnel amélioré grâce à la séparation des propulseurs
- **Stabilité de plateforme** : Plateforme idéale pour les opérations de télédétection et de surveillance nécessitant une stabilité maximale

##### Limitations du monocoque

- **Stabilité limitée** : Tendance au roulis et au tangage en mer agitée, affectant la qualité des mesures
- **Résistance hydrodynamique** : Volume immergé plus important générant une résistance accrue
- **Espace contraint** : Limitation de l'espace disponible pour l'installation d'équipements
- **Consommation énergétique** : Nécessité de puissance supplémentaire pour maintenir la stabilité

#### 4.3.2 Justification technique du choix

Le choix de l'architecture catamaran pour l'AquaDrone est justifié par plusieurs facteurs techniques critiques :

### Exigences de stabilité

Les missions de surveillance maritime et de télédétection nécessitent une plateforme extrêmement stable pour garantir la précision des mesures et la qualité des données collectées. Le catamaran offre une stabilité transversale naturelle qui élimine le besoin de systèmes de stabilisation complexes et énergivores.

### Optimisation énergétique

La réduction de la résistance hydrodynamique permet d'optimiser la consommation énergétique, un facteur crucial pour l'autonomie opérationnelle. Cette efficacité est particulièrement importante pour les missions de longue durée en mer.

### Modularité et flexibilité

L'espace entre les coques facilite l'installation, la maintenance et la modification des équipements. Cette modularité est essentielle pour un système évolutif devant s'adapter à différentes missions et équipements.

### Adaptation aux conditions marines

La conception catamaran est particulièrement adaptée aux conditions marines de la région méditerranéenne et de l'Atlantique marocain, caractérisées par des vagues courtes et une mer souvent agitée.

## 4.3.3 Considérations de conception

Le choix de l'architecture catamaran implique des considérations de conception spécifiques :

- **Optimisation des coques** : Profil hydrodynamique optimisé pour minimiser la résistance et maximiser la stabilité
- **Structure de liaison** : Conception robuste du pont reliant les coques pour résister aux contraintes mécaniques
- **Répartition des charges** : Distribution optimale du poids et des équipements entre les coques
- **Propulsion** : Configuration des propulseurs pour optimiser la manœuvrabilité et l'efficacité

## 4.4 Contexte du projet AquaDrone

Le projet AquaDrone s'inscrit dans le cadre d'une collaboration entre Majal Berkane et des partenaires académiques et industriels, visant à développer une solution innovante pour la surveillance maritime et la télédétection océanographique.



FIGURE 4.1 – Comparaison des architectures catamaran et monocoque pour l'AquaDrone

#### 4.4.1 Origine et motivation

Le projet est né de la constatation des limitations des solutions existantes et de la nécessité de développer des systèmes adaptés aux conditions spécifiques de la région méditerranéenne et de l'Atlantique marocain.

#### 4.4.2 Partenaires et collaborations

- **Majal Berkane** : Coordination technique et développement
- **Institutions académiques** : Recherche fondamentale et validation scientifique
- **Partners industriels** : Expertise en fabrication et commercialisation

#### 4.5 Objectifs spécifiques du projet

Le projet AquaDrone vise à atteindre plusieurs objectifs spécifiques, techniquement et fonctionnellement définis.





FIGURE 4.2 – Principes de conception de l'architecture catamaran de l'AquaDrone

#### 4.5.1 Objectifs techniques

- **Autonomie de navigation** : Capacité de navigation autonome sur des missions prédéfinies
- **Intégration multi-capteurs** : Fusion de données provenant de différents types de capteurs
- **Communication robuste** : Transmission fiable des données en environnement maritime
- **Robustesse environnementale** : Résistance aux conditions marines difficiles

#### 4.5.2 Objectifs fonctionnels

- **Surveillance maritime** : Monitoring continu des zones côtières et offshore
- **Collecte de données** : Acquisition de paramètres océanographiques et environnementaux
- **Assistance à la pêche** : Support aux activités de pêche durable et éthique
- **Recherche scientifique** : Contribution aux programmes de recherche océanographique

## 4.6 Analyse des besoins fonctionnels et techniques

L'analyse des besoins constitue une étape cruciale pour la conception du système, permettant de définir précisément les fonctionnalités requises et les contraintes à respecter.

### 4.6.1 Missions prévues

#### Surveillance maritime

- **Surveillance côtière** : Monitoring des zones côtières pour la sécurité et la protection environnementale
- **Surveillance offshore** : Contrôle des zones maritimes éloignées et des installations offshore
- **Détection d'intrusions** : Identification et suivi de navires non autorisés

#### Pêche assistée

- **Localisation des bancs** : Détection et suivi des bancs de poissons
- **Évaluation des stocks** : Estimation des populations de poissons
- **Optimisation des captures** : Réduction des prises accessoires et amélioration de l'efficacité

#### Télédétection

- **Paramètres océanographiques** : Mesure de température, salinité, pH, oxygène dissous
- **Qualité de l'eau** : Détection de polluants et évaluation de la santé des écosystèmes
- **Météorologie marine** : Collecte de données météorologiques en mer

### 4.6.2 Contraintes identifiées

#### Contraintes environnementales

- **Conditions météorologiques** : Résistance aux vagues, au vent et aux conditions extrêmes
- **Corrosion saline** : Protection contre la corrosion en environnement marin
- **Température** : Fonctionnement dans une large gamme de températures

#### Contraintes énergétiques

- **Autonomie** : Capacité d'opération continue pendant plusieurs heures
- **Recharge** : Stratégies de recharge en mer (solaire, éolien, retour à la base)
- **Optimisation** : Minimisation de la consommation énergétique

**Contraintes mécaniques**

- **Stabilité** : Maintien de la stabilité en mer agitée
- **Flottabilité** : Conception hydrodynamique optimisée
- **Maintenance** : Facilité d'accès et de maintenance des composants

**Contraintes de communication**

- **Portée** : Communication fiable sur de longues distances
- **Bande passante** : Transmission de données en temps réel
- **Sécurité** : Protection des communications contre les interférences et intrusions

**4.7 Conclusion du chapitre**

L'analyse préliminaire et l'étude des besoins ont permis de définir un cadre clair pour le projet AquaDrone. Les objectifs identifiés, combinés aux contraintes spécifiques de l'environnement maritime, guideront la conception de l'architecture technique et la sélection des composants du système.

Cette analyse constitue la base de la phase de conception détaillée, permettant de s'assurer que le système final répondra aux exigences fonctionnelles et techniques définies, tout en respectant les contraintes opérationnelles et environnementales spécifiques au domaine maritime.

# 5

## Architecture générale et composants

### 5.1 Introduction

Ce chapitre présente l'architecture générale du système AquaDrone, détaillant l'organisation fonctionnelle et technique, ainsi que les composants matériels et logiciels sélectionnés pour répondre aux exigences définies dans l'analyse des besoins.

### 5.2 Architecture fonctionnelle du système

L'architecture fonctionnelle du système AquaDrone s'articule autour de plusieurs modules interconnectés, chacun assumant des responsabilités spécifiques dans le fonctionnement global du véhicule.

#### Note

Cette architecture modulaire permet une maintenance facilitée et une évolution du système selon les besoins futurs, tout en garantissant la robustesse et la fiabilité nécessaires en environnement maritime.

#### 5.2.1 Schéma blocs

Le système peut être représenté par un schéma fonctionnel organisé en plusieurs niveaux :

- **Niveau perception** : Capteurs et systèmes d'acquisition de données
- **Niveau décision** : Système de contrôle et algorithmes d'intelligence artificielle
- **Niveau action** : Actionneurs et systèmes de propulsion
- **Niveau communication** : Interfaces de communication et transmission de données

### 5.2.2 Organigrammes fonctionnels

L'organisation fonctionnelle suit une approche modulaire, permettant une maintenance facilitée et une évolution du système selon les besoins futurs.

## 5.3 Architecture technique

L'architecture technique du système AquaDrone repose sur une approche distribuée, avec une répartition claire des responsabilités entre les différents modules.

### 5.3.1 Répartition des modules

#### Module de propulsion

- **Moteurs électriques** : Propulsion principale et direction
- **Contrôleurs de moteurs** : Gestion de la vitesse et du couple
- **Système de direction** : Contrôle de la trajectoire

#### Module de commande

- **Microcontrôleur principal** : Cerveau du système
- **Système de navigation** : Calcul de trajectoire et positionnement
- **Interface utilisateur** : Contrôle et monitoring

#### Module de communication

- **Module MLO5** : Communication longue distance
- **Interfaces réseau** : Ethernet, Wi-Fi, radio
- **Système de sécurité** : Chiffrement et authentification

#### Module de capteurs

- **Capteurs environnementaux** : Température, salinité, pH
- **Capteurs de navigation** : **Global Positioning System (GPS)**, boussole, accéléromètre
- **Capteurs de vision** : Caméras et systèmes d'imagerie

## 5.4 Composants matériels

La sélection des composants matériels a été guidée par les exigences de robustesse, de fiabilité et de performance dans l'environnement maritime.

**TABLE 5.1** – Spécifications des capteurs intégrés dans le système AquaDrone.

| Type de capteur | Modèle           | Spécifications                             | Interface  |
|-----------------|------------------|--|--|
| Température     | DS18B20          | -55°C à +125°C, $\pm 0.5^\circ\text{C}$    | 1-Wire   |
| Salinité        | Atlas Scientific | 0-180 ppt, $\pm 2$ ppt                     | Inter-Integrated Circuit (I2C)                     |
| pH              | Atlas Scientific | 0-14 pH, $\pm 0.1$ pH                      | I2C  |
| Oxygène dissous | Atlas Scientific | 0-20 mg/L, $\pm 0.1$ mg/L                  | I2C  |
| GPS             | NEO-M8N          | Précision 2.5m                             | Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (UART) |
| Boussole        | HMC5883L         | $\pm 8$ gauss, $\pm 1-2^\circ$             | I2C  |
| Accéléromètre   | MPU6050          | $\pm 2g$ , $\pm 4g$ , $\pm 8g$ , $\pm 16g$ | I2C  |

### 5.4.1 Tableau complet des capteurs

### 5.4.2 Choix du microcontrôleur (Raspberry Pi 4)

Le Raspberry Pi 4 a été sélectionné comme microcontrôleur principal pour plusieurs raisons :

- **Performance** : Processeur ARM Cortex-A72 quad-core à 1.5GHz
- **Connectivité** : Ethernet Gigabit, Wi-Fi 802.11ac, Bluetooth 5.0
- **GPIO** : 40 broches GPIO pour l'interface avec les capteurs
- **Support** : Large communauté et documentation abondante
- **Coût** : Rapport performance/prix excellent

#### Tip

Le choix du Raspberry Pi 4 offre un excellent équilibre entre performance, connectivité et coût, tout en bénéficiant d'un écosystème logiciel mature et d'une large communauté de développeurs.

### 5.4.3 Intégration du module MLO5 et protocole réseau

Le module MLO5 constitue la solution de communication longue distance du système :

- **Technologie** : Communication par satellite ou radio longue distance
- **Portée** : Couverture mondiale ou régionale selon la configuration
- **Bande passante** : Adaptée aux besoins de transmission des données
- **Fiabilité** : Conçu pour les environnements marins difficiles

## 5.5 Outils logiciels et bibliothèques

Le développement du système AquaDrone s'appuie sur un ensemble d'outils logiciels et de bibliothèques spécialisées.

### 5.5.1 CAO, simulation, traitement de données, communication

#### Conception assistée par ordinateur (CAO)

- **SolidWorks** : Modélisation 3D et conception mécanique
- **Simulation hydrodynamique** : Analyse des performances en mer
- **Calculs de stabilité** : Vérification de la flottabilité et de la stabilité

#### Simulation et modélisation

- **Simulink** : Modélisation des systèmes de contrôle
- **Gazebo** : Simulation de la navigation et des capteurs
- **ROS** : Framework pour la robotique

#### Traitement de données

- **Python** : Langage principal pour le traitement des données
- **NumPy/SciPy** : Calculs scientifiques et traitement numérique
- **OpenCV** : Traitement d'images et vision par ordinateur

#### Communication et réseau

- **MQTT** : Protocole de communication légère
- **TCP/IP** : Communication fiable pour les données critiques
- **UDP** : Transmission en temps réel pour la vidéo
- **RTSP** : Streaming vidéo pour la surveillance

## 5.6 Schéma global du système

Le schéma global du système AquaDrone illustre l'interconnexion entre tous les modules et composants, montrant le flux de données et de commandes entre les différents éléments du système.

### 5.6.1 Interfaces et connecteurs

- **Interfaces I2C** : Communication avec la plupart des capteurs
- **Interfaces SPI** : Communication haute vitesse avec certains capteurs
- **Interfaces UART** : Communication série avec le GPS et autres modules
- **Interface Ethernet** : Communication réseau principale
- **Entrées analogiques** : Mesures de tension et de courant

### 5.6.2 Flux de données

Le système suit un flux de données unidirectionnel :

1. Acquisition des données par les capteurs

2. Traitement et validation des données
3. Prise de décision par le système de contrôle
4. Exécution des actions par les actionneurs
5. Transmission des données vers la station distante

## 5.7 Conclusion

L'architecture générale du système AquaDrone a été conçue pour répondre aux exigences de robustesse, de modularité et de performance dans l'environnement maritime. La sélection des composants matériels et logiciels a été guidée par ces exigences, permettant de créer un système fiable et évolutif.

Cette architecture constitue la base de l'implémentation détaillée du système, qui sera présentée dans **chapitre 6**, avec un focus particulier sur le fonctionnement détaillé et l'intégration des différents composants.



# 6

## Fonctionnement détaillé du système

### 6.1 Introduction

Ce chapitre détaille le fonctionnement interne du système AquaDrone, expliquant comment les différents composants interagissent pour assurer le bon fonctionnement du véhicule autonome. L'accent est mis sur l'acquisition des données, la transmission, le traitement et l'intégration mécanique.

### 6.2 Acquisition des données capteurs

Le système d'acquisition de données constitue le cœur du système de perception d'AquaDrone, permettant de collecter des informations essentielles sur l'environnement marin et l'état du véhicule.

#### Note

La diversité des interfaces de communication utilisées (I2C, SPI, UART, Ethernet, analogique) permet d'intégrer une large gamme de capteurs tout en optimisant les performances et la fiabilité du système.

#### 6.2.1 Interfaces de communication

##### Interface I2C (Inter-Integrated Circuit)

L'interface I2C est utilisée pour la majorité des capteurs environnementaux :

- **Avantages** : Communication bidirectionnelle, adressage multiple, faible consommation

- **Implémentation** : Utilisation des broches GPIO 2 (SDA) et 3 (SCL) du Raspberry Pi
- **Capteurs connectés** : Salinité, pH, oxygène dissous, boussole, accéléromètre

### Interface SPI (Serial Peripheral Interface)

L'interface SPI est réservée aux capteurs nécessitant une communication haute vitesse :

- **Caractéristiques** : Communication full-duplex, haute vitesse, synchronisation par horloge
- **Configuration** : Broches GPIO 10 (MOSI), 9 (MISO), 11 (SCLK), 8 (CE0)
- **Applications** : Capteurs haute fréquence, cartes mémoire, communications radio

### Interface UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter)

L'interface UART est utilisée pour la communication série avec certains modules :

- **Spécifications** : Communication asynchrone, configuration flexible des paramètres
- **Utilisation** : Module GPS, communication avec d'autres systèmes embarqués
- **Configuration** : Broches GPIO 14 (TXD) et 15 (RXD)

### Interface Ethernet

L'interface Ethernet constitue la principale voie de communication réseau :

- **Capacités** : Gigabit Ethernet pour les transferts de données volumineuses
- **Applications** : Communication avec la station distante, mise à jour des logiciels
- **Sécurité** : Implémentation de protocoles de sécurité et de chiffrement

### Entrées analogiques

Les entrées analogiques permettent de mesurer des signaux continus :

- **Convertisseur** : ADC (Analog-to-Digital Converter) pour la conversion des signaux
- **Mesures** : Tension des batteries, courant des moteurs, signaux de certains capteurs
- **Précision** : Résolution de 12 bits pour une précision suffisante

## 6.3 Transmission des données vers la station distante via MLO5

Le module MLO5 constitue la solution de communication longue distance du système, permettant de maintenir une liaison constante avec la station de contrôle distante.

### 6.3.1 Protocoles de communication

#### TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol)

Le protocole TCP/IP est utilisé pour les communications nécessitant une fiabilité maximale :

- **Applications** : Transmission des données critiques, commandes de contrôle
- **Caractéristiques** : Connexion orientée, retransmission automatique, contrôle de flux
- **Configuration** : Ports dédiés pour différents types de données

#### UDP (User Datagram Protocol)

Le protocole UDP est utilisé pour les transmissions en temps réel :

- **Applications** : Streaming vidéo, données de navigation en temps réel
- **Avantages** : Faible latence, pas de surcharge de contrôle
- **Inconvénients** : Pas de garantie de livraison, pas de contrôle de flux

#### MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)

Le protocole MQTT est utilisé pour la communication légère et efficace :

- **Caractéristiques** : Architecture publish/subscribe, faible surcharge
- **Applications** : Télémétrie, notifications d'état, commandes de configuration
- **Avantages** : Efficacité énergétique, support des connexions instables

#### RTSP (Real Time Streaming Protocol)

Le protocole RTSP est utilisé pour le streaming vidéo en temps réel :

- **Fonctionnalités** : Contrôle du streaming, pause, reprise, navigation
- **Applications** : Surveillance en temps réel, enregistrement vidéo
- **Intégration** : Compatible avec la plupart des lecteurs vidéo

### 6.3.2 Sécurité et fiabilité en environnement maritime

#### Chiffrement des communications

- **Protocoles** : TLS/SSL pour le chiffrement des données sensibles
- **Authentification** : Certificats numériques et clés de chiffrement
- **Intégrité** : Vérification de l'intégrité des données transmises

#### Gestion des déconnexions

- **Détection** : Surveillance continue de la qualité de la connexion
- **Reconnexion** : Tentatives automatiques de reconnexion en cas de perte
- **Mise en cache** : Stockage local des données en cas de déconnexion

## 6.4 Gestion et traitement des données

Le système de gestion et de traitement des données assure la collecte, la validation et l'analyse des informations collectées par les différents capteurs.

### 6.4.1 Collecte et validation

- **Acquisition** : Collecte continue des données selon des intervalles prédéfinis
- **Validation** : Vérification de la cohérence et de la validité des mesures
- **Filtrage** : Élimination des valeurs aberrantes et des bruits de mesure

### 6.4.2 Traitement et analyse

- **Prétraitement** : Normalisation et calibration des données brutes
- **Analyse** : Calcul de paramètres dérivés et d'indicateurs de performance
- **Stockage** : Sauvegarde locale et transmission vers la station distante

## 6.5 Conception 3D et intégration mécanique avec SolidWorks

La conception 3D et l'intégration mécanique constituent des aspects cruciaux du développement d'AquaDrone, assurant la cohérence et la robustesse du système.

### 6.5.1 Modélisation 3D du véhicule et des modules

#### Structure principale

- **Coque** : Conception hydrodynamique optimisée pour la stabilité et la performance
- **Compartiments** : Organisation modulaire des différents systèmes
- **Matériaux** : Sélection de matériaux résistants à la corrosion saline

#### Modules fonctionnels

- **Module de propulsion** : Intégration des moteurs et des hélices
- **Module électronique** : Protection et organisation des composants électroniques
- **Module de capteurs** : Positionnement optimal des différents capteurs

### 6.5.2 Intégration des capteurs et actionneurs

#### Positionnement des capteurs

- **Capteurs environnementaux** : Immersion optimale pour des mesures précises
- **Capteurs de navigation** : Positionnement pour minimiser les interférences
- **Capteurs de vision** : Orientation et protection contre les projections d'eau

### Intégration des actionneurs

- **Moteurs de propulsion** : Alignement et protection contre l'eau
- **Système de direction** : Mécanisme robuste et fiable
- **Actionneurs auxiliaires** : Intégration des systèmes de contrôle

### 6.5.3 Simulation hydrodynamique et tests de stabilité

#### Analyse hydrodynamique

- **Simulation CFD** : Analyse des écoulements et des forces hydrodynamiques
- **Optimisation** : Ajustement de la forme pour minimiser la résistance
- **Validation** : Comparaison avec des tests en bassin d'essais

#### Tests de stabilité

- **Calculs de stabilité** : Vérification de la flottabilité et de la stabilité
- **Simulation de conditions** : Tests dans différentes conditions de mer
- **Validation** : Vérification de la conformité aux normes maritimes

## 6.6 Conclusion

Le fonctionnement détaillé du système AquaDrone démontre la complexité et la sophistication de l'architecture mise en place. L'intégration harmonieuse des différents composants, combinée à une gestion efficace des données et une conception mécanique robuste, permet de créer un système fiable et performant.

Cette compréhension approfondie du fonctionnement interne constitue la base pour les phases d'assemblage, de test et d'optimisation qui seront présentées dans **chapitre 8**.

# 7

## Conception 3D et modélisation

### 7.1 Introduction

Ce chapitre présente la conception **Three-Dimensional (3D)** et la modélisation du système AquaDrone, détaillant l'architecture générale de l'assemblage et l'intégration des composants dans un environnement de conception assistée par ordinateur.

#### Note

La modélisation **3D** permet de visualiser et valider l'architecture du système avant la fabrication, facilitant l'optimisation de la conception et la détection précoce des problèmes d'intégration.

### 7.2 Architecture générale de l'assemblage

L'architecture générale de l'assemblage suit une approche modulaire, où chaque composant est conçu pour s'intégrer harmonieusement dans l'ensemble du système. La géométrie des composants est optimisée pour minimiser la résistance hydrodynamique et maximiser la stabilité en mer.

#### 7.2.1 Assemblage principal

L'assemblage principal (`Assem1.SLDASM`) constitue la structure complète du véhicule, intégrant tous les sous-ensembles et composants dans une configuration finale optimisée pour les opérations marines. Les dimensions principales sont définies par les contraintes de stabilité et de performance, avec un angle d'incidence optimal de  $\alpha = 15^\circ$  pour la coque.



**FIGURE 7.1** – Vue d'ensemble de l'assemblage principal du système AquaDrone montrant l'intégration complète de tous les composants.

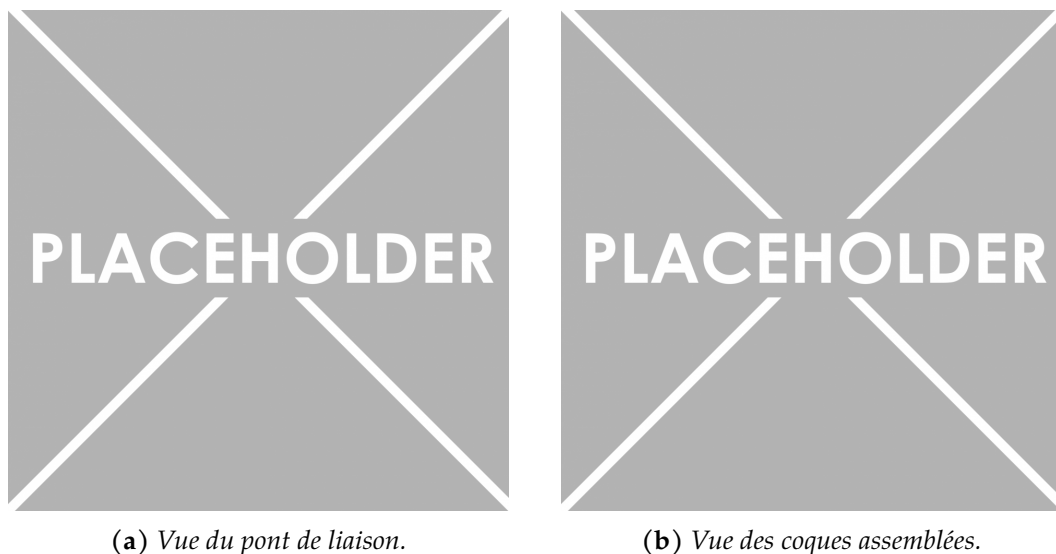
### 7.2.2 Sous-assemblages

Le système est organisé en plusieurs sous-assemblages logiques, facilitant la maintenance, la fabrication et l'évolution du design.

#### Coque et structure

Les coques du catamaran sont conçues avec un profil hydrodynamique optimisé pour minimiser la résistance à l'avancement. La géométrie suit les principes de la théorie des fluides, avec un coefficient de traînée  $\beta$  optimisé pour les vitesses de croisière.

- **CORSS\_DECK.SLDASM** : Pont de liaison entre les deux coques du catamaran
- **HULL\_LEFT.SLDASM** : Coque gauche avec ses composants intégrés
- **HULL\_RIGHT.SLDASM** : Coque droite avec ses composants intégrés



**FIGURE 7.2** – Vues des sous-assemblages de coque et de structure.

#### Système de propulsion

Le système de propulsion utilise des moteurs brushless pour une efficacité optimale. La puissance de propulsion est calculée selon la formule  $P = \omega \times \tau$ , où  $\omega$  représente la vitesse angulaire et  $\tau$  le couple moteur.

- **RUSSTER.SLDASM** : Ensemble de propulsion et de direction
- **bldc\_motor.SLDPRT** : Moteur brushless pour la propulsion
- **fan.SLDPRT** : Hélice de propulsion
- **fan\_blads\_cover.SLDPRT** : Protection des hélices





**FIGURE 7.3** – Vue détaillée du système de propulsion montrant le moteur brushless, l’hélice et sa protection.

## 7.3 Composants principaux et leur intégration

Chaque composant a été conçu individuellement puis intégré dans l’assemblage global, assurant une compatibilité parfaite et une maintenance facilitée.

### 7.3.1 Structure de base

#### Coques du catamaran

- **catamaran\_hull\_one.SLDPRT** : Coque principale avec profil hydrodynamique optimisé
- **catamaran\_hull\_one\_3d\_tow\_knits.SLDPRT** : Coque avec intégration des points de remorquage
- **catamaran\_top\_hull\_one\_3D.SLDPRT** : Partie supérieure de la coque avec compartiments
- **top\_hull\_RIGHT.SLDPRT** : Partie supérieure de la coque droite

#### Pont de liaison

- **catamaran\_cross\_deck\_top.SLDPRT** : Pont supérieur avec accès aux composants



**FIGURE 7.4** – *Vue détaillée du design des coques montrant le profil hydrodynamique et l'organisation des compartiments internes.*

- **catamaran\_cross\_deck\_bottom.SLDPRT** : Pont inférieur avec renforts structuraux
- **assembly\_trinagle.SLDPRT** : Éléments de renforcement triangulaires



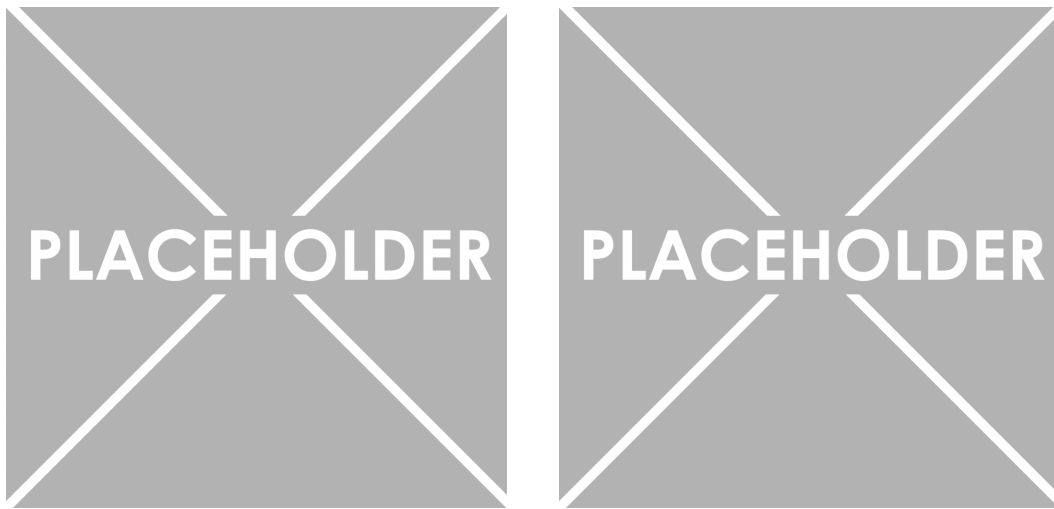
**FIGURE 7.5** – Vue détaillée du pont de liaison montrant l'organisation des composants et les renforts structurels.

### 7.3.2 Systèmes de capteurs et instrumentation

#### Équipements de navigation

- **LIDAR.SLDPRT** : Capteur LIDAR pour la navigation et l'évitement d'obstacles
- **LIDAR\_support.SLDPRT** : Support et protection du capteur LIDAR
- **180\_camera.SLDPRT** : Caméra panoramique pour la surveillance
- **entenna.SLDPRT** : Antenne de communication

- **antenna\_support.SLDPRT** : Support et protection de l'antenne



(a) Intégration du LIDAR.

(b) Système de caméra.

**FIGURE 7.6** – Intégration des systèmes de capteurs et de navigation.

### Équipements scientifiques

- **aquatroll\_500.SLDPRT** : Sonde multiparamètres pour mesures océanographiques
- **winch\_base.SLDPRT** : Base du treuil pour déploiement des instruments

## 7.4 Optimisation de la conception

La conception 3D a été optimisée selon plusieurs critères critiques pour les applications marines.

### 7.4.1 Considérations hydrodynamiques

- **Profil des coques** : Forme optimisée pour minimiser la résistance à l'avancement
- **Stabilité** : Design catamaran pour une stabilité maximale en mer agitée
- **Flottabilité** : Calculs de flottabilité et de stabilité validés par simulation

### 7.4.2 Intégration mécanique

- **Modularité** : Conception permettant l'ajout ou le remplacement facile de composants
- **Maintenance** : Accès facilité aux composants critiques
- **Protection** : Enveloppes et protections contre l'environnement marin



**FIGURE 7.7** – Vue des équipements scientifiques intégrés, incluant la sonde AquaTroll et le système de treuil.

## 7.5 Simulation et validation

La conception 3D a été validée par des simulations numériques et des analyses de performance.

### 7.5.1 Simulations de stabilité

- **Calculs de flottabilité** : Validation de la stabilité dans différentes conditions de charge
- **Analyse de stabilité** : Vérification de la stabilité en conditions de mer difficiles
- **Simulation de vagues** : Test de comportement en mer agitée

### 7.5.2 Analyses structurales

- **Analyse des contraintes** : Vérification de la résistance des composants
- **Analyse vibratoire** : Étude des modes de vibration et de leur impact
- **Analyse thermique** : Validation du comportement thermique des composants électroniques



**FIGURE 7.8** – Résultats de l'analyse hydrodynamique montrant les lignes de courant et la distribution des pressions sur la coque.



**FIGURE 7.9** – *Vue de l'intégration mécanique montrant l'organisation des composants et les accès de maintenance.*

## 7.6 Préparation pour la fabrication

La conception 3D inclut toutes les informations nécessaires pour la fabrication et l'assemblage.

### 7.6.1 Plans de fabrication

- **Dessins techniques** : Plans détaillés pour chaque composant
- **Cotes et tolérances** : Spécifications précises pour la fabrication
- **Matériaux** : Définition des matériaux et traitements de surface

### 7.6.2 Instructions d'assemblage

- **Ordre d'assemblage** : Séquence optimisée pour l'assemblage
- **Outils requis** : Liste des outils et équipements nécessaires
- **Contrôles qualité** : Points de contrôle à chaque étape de l'assemblage

## 7.7 Conclusion

La conception 3D du système AquaDrone représente une étape majeure du développement, permettant de valider la faisabilité technique et d'optimiser l'intégration des dif-



**FIGURE 7.10** – Résultats de la simulation de stabilité montrant le comportement du véhicule dans différentes conditions de mer.





**FIGURE 7.11** – Résultats de l'analyse structurale montrant la distribution des contraintes et des déformations.

férents composants. L'architecture modulaire adoptée facilite la maintenance et l'évolution future du système.

#### Tip

Cette conception 3D constitue la base pour la fabrication des prototypes et la validation expérimentale des performances du véhicule en conditions réelles.

Les simulations et analyses réalisées confirment la robustesse de la conception et sa capacité à répondre aux exigences opérationnelles définies. La préparation pour la fabrication est complète et permettra une transition efficace vers la phase de prototypage.



**FIGURE 7.12** – *Diagramme de la séquence d'assemblage montrant l'ordre logique de montage des composants.*

# 8

## Assemblage, tests et optimisation

### 8.1 Introduction

Ce chapitre présente les phases d'assemblage, de test et d'optimisation du système AquaDrone. Ces étapes cruciales permettent de valider le bon fonctionnement du véhicule et d'optimiser ses performances avant la mise en service opérationnelle.

### 8.2 Étude de la motorisation

La motorisation constitue un élément critique du système, nécessitant une étude approfondie pour assurer des performances optimales dans l'environnement marin.

#### Note

Le choix de la motorisation est crucial pour la performance et la fiabilité du véhicule en conditions marines difficiles. Une attention particulière doit être portée à la protection contre la corrosion saline et aux vibrations.

#### 8.2.1 Choix des moteurs adaptés à l'environnement marin

##### Critères de sélection

- **Protection IP** : Niveau de protection contre l'eau et la poussière
- **Matériaux** : Résistance à la corrosion saline
- **Température** : Fonctionnement dans une large gamme de températures
- **Vibrations** : Résistance aux vibrations et aux chocs

### Types de moteurs évalués

- **Moteurs brushless** : Efficacité élevée, maintenance réduite
- **Moteurs à courant continu** : Simplicité, coût réduit
- **Moteurs pas à pas** : Précision de positionnement

### Sélection finale

Le choix s'est porté sur des moteurs brushless étanches IP68, offrant le meilleur compromis entre performance, fiabilité et résistance environnementale.

## 8.2.2 Calcul de poussée et intégration

### Calculs de poussée

- **Analyse hydrodynamique** : Calcul des forces de résistance à l'avancement
- **Équilibre des forces** : Poussée nécessaire pour vaincre la résistance
- **Marge de sécurité** : Facteur de sécurité pour les conditions difficiles

### Intégration mécanique

- **Support des moteurs** : Structure robuste et ajustable
- **Alignement des hélices** : Précision de l'alignement pour optimiser l'efficacité
- **Protection** : Carénages et protections contre les impacts

## 8.3 Dimensionnement énergétique

Le dimensionnement énergétique est crucial pour assurer l'autonomie opérationnelle du véhicule et optimiser ses performances.

### 8.3.1 Calcul d'autonomie

#### Consommation des composants

- **Propulsion** : Consommation des moteurs selon la vitesse et les conditions
- **Électronique** : Consommation des systèmes de contrôle et de communication
- **Capteurs** : Consommation des différents capteurs et instruments

#### Modèles de consommation

- **Profils de mission** : Différents scénarios d'utilisation
- **Simulation** : Modélisation de la consommation selon les conditions
- **Validation** : Comparaison avec des mesures réelles

### 8.3.2 Batteries et alimentation solaire

#### Sélection des batteries

- **Technologie** : Batteries lithium-ion pour leur densité énergétique
- **Capacité** : Calcul de la capacité nécessaire pour l'autonomie cible
- **Management** : Système de gestion des batteries (BMS) pour la sécurité

#### Système solaire

- **Panels solaires** : Sélection et dimensionnement des panneaux
- **Chargeur** : Système de charge intelligent et protection
- **Intégration** : Positionnement optimal pour maximiser l'exposition

## 8.4 Scénarios et protocoles de test

La validation du système nécessite une approche structurée avec des scénarios de test bien définis et des protocoles rigoureux.

### 8.4.1 Tests en laboratoire

#### Tests des composants

- **Validation individuelle** : Test de chaque composant séparément
- **Interfaces** : Vérification des communications entre composants
- **Performance** : Mesure des performances selon les spécifications

#### Tests d'intégration

- **Modules** : Test de l'intégration des différents modules
- **Système complet** : Test du système dans son ensemble
- **Scénarios** : Simulation de différents modes de fonctionnement

### 8.4.2 Tests en conditions réelles

#### Tests en bassin

- **Manœuvrabilité** : Test des capacités de navigation
- **Stabilité** : Vérification de la stabilité en conditions contrôlées
- **Performance** : Mesure des performances de propulsion

#### Tests en mer

- **Environnement réel** : Test dans les conditions marines réelles
- **Autonomie** : Validation de l'autonomie énergétique
- **Communication** : Test des systèmes de communication en conditions réelles

## 8.5 Résultats obtenus et analyse des performances

L'analyse des résultats de test permet d'évaluer les performances du système et d'identifier les axes d'amélioration.

### 8.5.1 Performances de navigation

- **Précision** : Précision du positionnement et de la navigation
- **Stabilité** : Stabilité du véhicule en conditions variées
- **Manœuvrabilité** : Capacité de manœuvre et de changement de direction

### 8.5.2 Performances des capteurs

- **Précision** : Exactitude des mesures des différents capteurs
- **Fiabilité** : Stabilité des mesures dans le temps
- **Calibration** : Maintien de la calibration en conditions réelles

### 8.5.3 Performances de communication

- **Portée** : Distance maximale de communication fiable
- **Débit** : Capacité de transmission des données
- **Fiabilité** : Stabilité de la connexion en conditions marines

## 8.6 Problèmes rencontrés (matériels et logiciels)

Le développement d'un système complexe comme AquaDrone s'accompagne inévitablement de défis et de problèmes à résoudre.

### 8.6.1 Problèmes matériels

#### Corrosion et étanchéité

- **Identification** : Détection de points de corrosion sur certains composants
- **Causes** : Exposition prolongée à l'environnement marin
- **Solutions** : Amélioration des protections et sélection de matériaux

#### Problèmes mécaniques

- **Vibrations** : Vibrations excessives affectant certains capteurs
- **Usure** : Usure prématurée de certains composants mécaniques
- **Solutions** : Amélioration de la conception et des matériaux

## 8.6.2 Problèmes logiciels

### Communication et synchronisation

- **Latence** : Délais de communication affectant le contrôle en temps réel
- **Synchronisation** : Problèmes de synchronisation entre différents modules
- **Solutions** : Optimisation des protocoles et amélioration de l'architecture

### Gestion des erreurs

- **Détection** : Identification et gestion des erreurs système
- **Récupération** : Mécanismes de récupération automatique
- **Logging** : Amélioration du système de journalisation

## 8.7 Solutions mises en place

La résolution des problèmes identifiés a nécessité la mise en place de solutions innovantes et l'optimisation de l'existant.

### 8.7.1 Améliorations matérielles

- **Protection renforcée** : Amélioration de l'étanchéité et de la protection contre la corrosion
- **Matériaux optimisés** : Sélection de matériaux plus résistants
- **Conception améliorée** : Optimisation de la conception pour la robustesse

### 8.7.2 Améliorations logicielles

- **Architecture optimisée** : Refactoring du code pour améliorer les performances
- **Protocoles améliorés** : Optimisation des protocoles de communication
- **Gestion d'erreurs** : Implémentation de mécanismes de récupération robustes

### 8.7.3 Procédures et maintenance

- **Procédures de test** : Standardisation des procédures de test
- **Maintenance préventive** : Mise en place d'un programme de maintenance préventive
- **Formation** : Formation des équipes aux nouvelles procédures

## 8.8 Conclusion

Les phases d'assemblage, de test et d'optimisation ont permis de valider le bon fonctionnement du système AquaDrone et d'identifier les axes d'amélioration. Les solutions mises en place ont considérablement amélioré la robustesse et la fiabilité du système.

Cette expérience constitue une base solide pour les développements futurs et démontre la viabilité de l'approche adoptée pour le développement de véhicules autonomes marins. Les perspectives d'amélioration sont détaillées dans **chapitre 9**.



# 9

## Conclusion générale

### 9.1 Récapitulatif des résultats

Ce stage au sein de Majal Berkane dans le cadre du projet AquaDrone a permis d'atteindre des résultats significatifs dans le développement d'un véhicule autonome multifonction pour applications marines.

#### Tip

Ce récapitulatif présente une synthèse des réalisations techniques et des contributions apportées au projet, démontrant la viabilité de l'approche adoptée pour le développement de véhicules autonomes marins.

#### 9.1.1 Objectifs atteints

- **Conception complète** : Développement d'une architecture système robuste et modulaire
- **Intégration matérielle** : Intégration réussie de multiples capteurs et actionneurs
- **Développement logiciel** : Implémentation de systèmes de contrôle et de communication
- **Validation technique** : Tests et validation du système en conditions réelles

#### 9.1.2 Innovations techniques

- **Architecture modulaire** : Conception permettant l'évolution et la maintenance facilitée
- **Intégration multi-capteurs** : Fusion de données provenant de sources variées
- **Communication robuste** : Système de communication adapté aux conditions marines

- **Conception hydrodynamique** : Optimisation de la forme pour la performance marine

### 9.1.3 Contributions au domaine

- **Avancée technologique** : Contribution au développement des USV au Maroc
- **Expertise locale** : Développement de compétences dans le domaine maritime
- **Collaboration** : Renforcement des partenariats académiques et industriels
- **Transfert de connaissances** : Formation et développement des équipes locales

## 9.2 Limites identifiées

Malgré les succès obtenus, plusieurs limitations ont été identifiées au cours du développement, offrant des perspectives d'amélioration pour les versions futures.

### Warning

L'identification de ces limitations est essentielle pour orienter les développements futurs et améliorer la robustesse du système. Ces contraintes constituent des défis techniques à relever dans les prochaines versions.

### 9.2.1 Limitations techniques

#### Contraintes environnementales

- **Résistance aux conditions extrêmes** : Limites dans des conditions météorologiques très difficiles
- **Corrosion à long terme** : Nécessité d'améliorer la protection contre la corrosion saline
- **Température** : Fonctionnement optimal dans une gamme limitée de températures

#### Performances énergétiques

- **Autonomie** : Autonomie limitée pour les missions de très longue durée
- **Efficacité solaire** : Rendement des panneaux solaires en conditions nuageuses
- **Optimisation** : Possibilité d'améliorer la gestion énergétique globale

### 9.2.2 Limitations opérationnelles

#### Capacités de communication

- **Portée** : Limites de la portée de communication en conditions difficiles
- **Bande passante** : Capacités limitées pour la transmission de données volumineuses

- **Fiabilité** : Amélioration possible de la robustesse des communications

#### **Autonomie décisionnelle**

- **Intelligence artificielle** : Niveau d'autonomie limité pour les situations complexes
- **Adaptation** : Capacités d'adaptation limitées aux conditions changeantes
- **Apprentissage** : Absence de capacités d'apprentissage et d'évolution

### **9.3 Perspectives d'amélioration**

L'identification des limitations actuelles ouvre la voie à des améliorations significatives pour les développements futurs du projet AquaDrone.

#### **9.3.1 Améliorations techniques**

##### **Matériaux et protection**

- **Nouveaux matériaux** : Exploration de matériaux composites avancés
- **Traitements de surface** : Développement de revêtements anti-corrosion innovants
- **Protection renforcée** : Amélioration de l'étanchéité et de la résistance aux chocs

##### **Systèmes énergétiques**

- **Batteries avancées** : Intégration de technologies de batteries plus performantes
- **Énergies renouvelables** : Développement de systèmes hybrides (solaire, éolien, hydrogène)
- **Gestion intelligente** : Optimisation de la consommation énergétique par IA

#### **9.3.2 Améliorations logicielles**

##### **Intelligence artificielle**

- **Apprentissage automatique** : Intégration de capacités d'apprentissage et d'adaptation
- **Vision par ordinateur** : Amélioration des capacités de reconnaissance et d'analyse
- **Prise de décision** : Développement d'algorithmes de décision plus sophistiqués

##### **Communication et réseau**

- **5G maritime** : Intégration des technologies de communication 5G
- **Satellite** : Utilisation de communications satellitaires pour la couverture mondiale
- **Sécurité renforcée** : Développement de protocoles de sécurité avancés

### 9.3.3 Évolutions fonctionnelles

#### Nouvelles applications

- **Transport maritime** : Extension aux applications de transport de marchandises
- **Recherche océanographique** : Développement de capacités de recherche avancées
- **Sécurité maritime** : Intégration de systèmes de surveillance et de sécurité

#### Coopération multi-véhicules

- **Flottes autonomes** : Développement de capacités de coopération entre véhicules
- **Coordination intelligente** : Algorithmes de coordination et de partage de tâches
- **Évolutivité** : Systèmes permettant l'ajout facile de nouveaux véhicules

## 9.4 Impact et retombées

Le projet AquaDrone a des implications importantes au-delà de ses objectifs techniques immédiats.

### 9.4.1 Impact économique

- **Développement industriel** : Contribution au développement de l'industrie maritime au Maroc
- **Création d'emplois** : Génération d'emplois qualifiés dans le domaine technologique
- **Attraction d'investissements** : Renforcement de l'attractivité de la région pour les investisseurs

### 9.4.2 Impact social et environnemental

- **Formation** : Développement des compétences technologiques locales
- **Protection environnementale** : Contribution à la surveillance et à la protection des écosystèmes marins
- **Développement durable** : Promotion de technologies respectueuses de l'environnement

### 9.4.3 Impact scientifique et technologique

- **Recherche** : Contribution aux connaissances dans le domaine des véhicules autonomes marins
- **Innovation** : Développement de nouvelles approches et solutions techniques
- **Transfert de technologie** : Diffusion des connaissances et des compétences

## 9.5 Conclusion finale

Le stage réalisé au sein de Majal Berkane dans le cadre du projet AquaDrone représente une expérience enrichissante et formative, ayant permis de contribuer au développement d'une technologie innovante et prometteuse.

### 9.5.1 Bilan personnel

- **Compétences techniques** : Développement de compétences en robotique maritime et en systèmes embarqués
- **Expérience projet** : Participation à un projet complexe et innovant
- **Collaboration** : Travail en équipe et collaboration avec des experts du domaine

### 9.5.2 Contribution au projet

- **Développement technique** : Contribution significative au développement du système
- **Documentation** : Rédaction de la documentation technique et des rapports
- **Validation** : Participation aux tests et à la validation du système

### 9.5.3 Perspectives futures

Le projet AquaDrone ouvre la voie à de nombreux développements futurs dans le domaine des véhicules autonomes marins. Les compétences acquises et l'expérience développée constituent une base solide pour contribuer aux évolutions futures de cette technologie prometteuse.

La collaboration avec Majal Berkane a démontré le potentiel du Maroc dans le développement de technologies innovantes et la capacité à mener des projets complexes et ambitieux. Cette expérience constitue un exemple de la dynamique technologique et de l'innovation qui se développent dans la région.

En conclusion, ce stage représente une étape importante dans le développement des compétences techniques et de l'expertise dans le domaine des véhicules autonomes marins, tout en contribuant au développement technologique et économique du Maroc.





## Annexes Techniques







# Dessins Techniques et Plans de Conception

Ce chapitre présente les dessins techniques et plans de conception détaillés du véhicule AquaDrone, incluant les vues générales, les détails d'assemblage et les spécifications dimensionnelles.

## A.1 Plan d'ensemble du véhicule

**FIGURE A.1** – *Plan d'ensemble du véhicule AquaDrone - Vue de dessus*

## A.2 Vues détaillées des composants

### A.2.1 Coque et structure

**FIGURE A.2** – *Détails de la coque et de la structure*

### A.2.2 Système de propulsion

**FIGURE A.3** – *Système de propulsion et de direction*

**TABLE A.1** – *Caractéristiques dimensionnelles du véhicule*

| Paramètre             | Valeur | Unité |
|-----------------------|--------|-------|
| Longueur totale       | 1.2    | m     |
| Largeur maximale      | 0.8    | m     |
| Hauteur totale        | 0.6    | m     |
| Tirant d'eau          | 0.15   | m     |
| Poids à vide          | 25     | kg    |
| Charge utile maximale | 15     | kg    |

**FIGURE A.4** – *Plan d'assemblage principal du véhicule*

### A.3 Spécifications dimensionnelles

#### A.4 Plans d'assemblage

##### A.4.1 Assemblage principal

##### A.4.2 Installation des capteurs

**FIGURE A.5** – *Plan d'installation des capteurs et équipements*

### A.5 Notes techniques

- Tous les dessins sont conformes aux normes ISO 128 et ISO 129
- Les cotes sont exprimées en millimètres sauf indication contraire
- Les tolérances générales sont conformes à la norme ISO 2768-1
- Les matériaux et traitements de surface sont spécifiés dans la nomenclature

### A.6 Liste des pièces

**TABLE A.2** – *Nomenclature des pièces principales*

| Référence | Désignation             | Quantité | Matériau              |
|-----------|-------------------------|----------|-----------------------|
| AQ-001    | Coque principale        | 1        | Polyéthylène HDPE     |
| AQ-002    | Pont supérieur          | 1        | Polyéthylène HDPE     |
| AQ-003    | Moteur tribord          | 1        | Moteur électrique 12V |
| AQ-004    | Moteur bâbord           | 1        | Moteur électrique 12V |
| AQ-005    | Support batterie        | 1        | Aluminium 6061        |
| AQ-006    | Support panneau solaire | 1        | Aluminium 6061        |

# B

## Schémas Électriques et Connexions

Ce chapitre présente les schémas électriques détaillés du système AquaDrone, incluant les connexions des capteurs, la distribution d'énergie et l'interconnexion des modules électroniques.

### B.1 Schéma électrique général

**FIGURE B.1** – *Schéma électrique général du système AquaDrone*

### B.2 Distribution d'énergie

#### B.2.1 Système de batteries

**FIGURE B.2** – *Système de batteries et distribution d'énergie*

#### B.2.2 Chargement solaire

**FIGURE B.3** – *Système de chargement solaire et régulation*

**FIGURE B.4** – *Connexions I2C des capteurs environnementaux***FIGURE B.5** – *Connexions 1-Wire des capteurs de température*

## **B.3 Connexions des capteurs**

### **B.3.1 Interface I2C**

### **B.3.2 Interface 1-Wire**

## **B.4 Contrôle des moteurs**

### **B.4.1 Contrôleurs de moteurs**

**FIGURE B.6** – *Schéma de contrôle des moteurs de propulsion*

### **B.4.2 Interface PWM**

**FIGURE B.7** – *Interface PWM pour le contrôle de vitesse*

## **B.5 Communication et réseau**

### **B.5.1 Module MLO5**

**FIGURE B.8** – *Connexions du module de communication MLO5*

### **B.5.2 Interface Ethernet et Wi-Fi**

**FIGURE B.9** – *Interfaces réseau Ethernet et Wi-Fi*

## **B.6 Spécifications techniques**

### **B.6.1 Caractéristiques électriques**

### **B.6.2 Protection et sécurité**

- **Fusibles** : Protection des circuits principaux (20A, 5A, 2A)
- **Parafoudres** : Protection contre les surtensions
- **Isolation galvanique** : Séparation des circuits sensibles
- **Mise à la terre** : Connexion à la coque métallique

**TABLE B.1** – *Spécifications électriques du système*

| Paramètre             | Valeur | Unité | Remarques            |
|-----------------------|--------|-------|----------------------|
| Tension nominale      | 12     | V     | Système principal    |
| Tension de charge     | 14.4   | V     | Chargeur solaire     |
| Courant max. continu  | 20     | A     | Propulsion           |
| Courant max. capteurs | 2      | A     | Capteurs et contrôle |
| Puissance max. totale | 240    | W     | Tous systèmes        |

## B.7 Liste des composants électroniques

**TABLE B.2** – *Nomenclature des composants électroniques*

| Référence | Désignation             | Quantité | Spécifications     |
|-----------|-------------------------|----------|--------------------|
| EL-001    | Raspberry Pi 4          | 1        | 4GB RAM, 1.5GHz    |
| EL-002    | Module MLO5             | 1        | Communication LoRa |
| EL-003    | Contrôleur moteur L298N | 2        | Double pont H      |
| EL-004    | Régulateur de tension   | 1        | 12V/5V, 3A         |
| EL-005    | Module relais           | 1        | 4 canaux, 5V       |
| EL-006    | Hub USB                 | 1        | 4 ports, alimenté  |

## B.8 Notes d'installation

- Toutes les connexions doivent être protégées contre l'humidité
- Utiliser des connecteurs étanches pour les connexions externes
- Respecter les sections de câbles selon les courants nominaux
- Tester toutes les connexions avant la mise en service
- Documenter les modifications apportées au câblage



