



UNIVERSITÉ DE TOULON

UFR SCIENCES ET TECHNIQUES
LICENCE RENFORCÉE DE SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR

Rapport du Projet Personnel de Recherche

CONCEPTION D'UN ROBOT SOUS-MARIN BIO-INSPIRÉ TYPE
RAIE MANTA



Table des matières

1	Introduction	1
2	Analyse biomimétique	2
2.1	Anatomie et locomotion de la raie manta	2
2.2	Paramètres de nage à reproduire	2
2.3	Transposition en robotique	3
3	Spécifications techniques	4
3.1	Contraintes fonctionnelles	4
3.2	Critères de performance visés	4
3.3	Synthèse des besoins	5
4	Conception mécanique	6
4.1	Structure globale du robot	6
4.2	Matériaux choisis (PVC, nylon PA12, etc.)	6
4.3	Design des ailes flexibles	6
4.4	Étanchéité et boîtier	7
5	Architecture électronique	8
5.1	Module WiFi ESP8266 et communication	8
5.2	Alimentation (9V, LiPo, régulateur LM2596)	8
5.3	Capteurs (JSN-SR04T, MPU6050, MS5837, DHT22)	8
6	Programmation et contrôle	10
6.1	Gestion des servomoteurs	10
6.2	Lecture des capteurs	11
6.3	Contrôle via WiFi	11
6.4	Algorithmes prévus	12
7	Planification des tests	13
7.1	Tests fonctionnels prévus	13
7.2	Mesures attendues	13
8	Résultats attendus	15
8.1	Modélisation de la propulsion	15
8.2	Estimation de la vitesse	16
8.3	Fiabilité et consommation estimées	16
9	Conclusion	18

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Mr Vincent HUGEL, du laboratoire COSMER, dont l'implication, l'aide précieuse, le temps et les conseils éclairés ont été essentiels tout au long de l'élaboration de mon projet personnel de recherche.

Chapitre 1

Introduction

Les milieux sous-marins constituent de plus en plus des zones d'une importance primordiale pour la recherche scientifique, l'exploration des ressources, la surveillance environnementale et le développement d'applications industrielles. Ces environnements recèlent une biodiversité incroyable et des ressources naturelles précieuses. Ils jouent un rôle clé dans la régulation des équilibres climatiques. Il est cependant difficile d'accéder à ces profondeurs.

Les véhicules sous-marins actuels font face à diverses limitations : le déplacement dans l'eau, la densité élevée de ce milieu, la pression croissante en profondeur, les contraintes énergétiques ou encore les exigences d'étanchéité. De plus, ces véhicules sont souvent difficile à manier. Leur consommation est élevée et ils ont du mal de s'adapter à des environnements changeants ou inconnus.

Pour répondre à ces obstacles, les ingénieurs s'inspirent de la nature. C'est ce qu'on appelle le bio-mimétisme. Cette approche consiste à imiter les formes, les structures et les modes de déplacements des animaux marins tels que les poissons, les raies, les méduses ou les calamars qui ont su se déplacer efficacement dans l'eau depuis des millions d'années. Les ingénieurs visent à transposer les solutions développées par la nature pour résoudre les problèmes de la robotique moderne.

Les robots bio-inspirés utilisent une propulsion ondulatoire, des nageoires souples ou des corps segmentés pour offrir une meilleure agilité et une meilleure efficacité énergétique. Cela rend les robots plus adaptatifs. Ils peuvent donc naviguer dans des zones plus étroites, résister plus facilement aux courants et interagir avec des structures fragiles sans le risque de les endommager.

Les robots bio-inspirés ouvrent le chemin à de nombreuses applications : surveillance écologique des écosystèmes marins, exploration des zones inaccessibles, cartographie des fonds marins ou encore inspection d'infrastructures offshore. De plus, ces innovations permettent de collecter des données en continu, contribuant ainsi à une meilleure compréhension et protection des océans.

Ce rapport détaillera dans un premier temps les caractéristiques biomimétiques de la raie manta, puis les choix techniques associés à la conception du robot, jusqu'à la planification des tests à venir.

Chapitre 2

Analyse biomimétique

2.1 Anatomie et locomotion de la raie manta

La raie manta (*Manta birostris*) est un poisson cartilagineux appartenant à la famille des Myliobatidae. Sa nage est réputée pour sa grâce, son efficacité et son silence. Son corps plat et large, pouvant atteindre jusqu'à 7 mètres d'envergure, est prolongé par deux grandes nageoires pectorales triangulaires qui ondulent de manière synchronisée pour propulser l'animal dans l'eau.

Contrairement aux poissons utilisant une propulsion caudale (par la queue), la raie manta adopte un mode de locomotion dit « balistique oscillatoire », dans lequel ses nageoires battent comme des ailes. Cette nage est non seulement élégante mais aussi économique en énergie, car elle génère un flux laminaire stable avec peu de turbulence, ce qui réduit la traînée hydrodynamique.

L'anatomie de la raie est également caractérisée par une grande flexibilité de ses nageoires et une musculature interne optimisée pour des mouvements ondulatoires. Les extrémités des nageoires peuvent se déformer pour moduler la poussée et faciliter les manœuvres, ce qui permet à l'animal de se déplacer avec une agilité remarquable, même à faible vitesse.

2.2 Paramètres de nage à reproduire

Pour concevoir un robot bio-inspiré efficace, il est essentiel d'identifier et de reproduire les paramètres clés de la locomotion de la raie manta. Ces paramètres incluent :

- **Amplitude et fréquence des ondulations** : les nageoires de la raie génèrent des ondes d'amplitude variable, typiquement de 20 à 40 cm, avec une fréquence de 0.2 à 1.5 Hz selon la vitesse de déplacement.
- **Profil de mouvement des nageoires** : le déplacement des nageoires suit une onde sinusoïdale ou quasi-sinusoïdale se propageant de l'avant vers l'arrière.
- **Angle de battement** : l'angle de flexion maximum des nageoires par rapport au plan horizontal varie généralement entre 15 et 30 degrés.
- **Souplesse et déformation** : la capacité des nageoires à se courber localement joue un rôle essentiel dans la production de portance et la manœuvrabilité.
- **Rapport portance/traînée** : optimiser ce rapport est crucial pour garantir une propulsion économique en énergie.

Ces caractéristiques doivent être modélisées et traduites en paramètres de conception mécanique et de commande pour un robot.

2.3 Transposition en robotique

La transposition des caractéristiques de la raie manta en robotique biomimétique implique des choix techniques complexes, notamment en matière de matériaux, d'actionneurs, de contrôle et d'hydrodynamique.

Le corps du robot est généralement conçu à partir de matériaux souples ou semi-rigides pour permettre des mouvements ondulatoires proches de ceux d'une raie réelle. Les nageoires sont souvent réalisées en silicium ou en polymères élastiques, couplés à des actionneurs tels que des servomoteurs, des moteurs linéaires ou encore des muscles artificiels (type SMA ou actuateurs diélectriques).

Le mouvement ondulatoire est contrôlé via un algorithme de commande centralisé ou distribué, générant des signaux sinusoïdaux ou des courbes de Bézier modulables selon les conditions de navigation. L'accent est mis sur la fluidité et la synchronisation du mouvement pour limiter la consommation énergétique.

En hydrodynamique, des simulations numériques (CFD) permettent d'optimiser la forme et les propriétés mécaniques des nageoires pour maximiser la poussée et minimiser la traînée. Certains prototypes expérimentaux, comme le robot *MantaDroid* (Fig. 2.1) développé par CHEW, LIM et YEO 2015, professeurs à la National University of Singapore, ont démontré la faisabilité de ce type de locomotion dans des environnements contrôlés.

Enfin, la navigation et la stabilité sont souvent assurées par des capteurs inertiels, des caméras ou des capteurs de pression intégrés, permettant au robot d'évoluer de manière autonome ou semi-autonome dans un milieu sous-marin complexe.



FIGURE 2.1 – Exemple de robot bio-inspiré : MantaDroid (source : NUS)

Chapitre 3

Spécifications techniques

3.1 Contraintes fonctionnelles

Le robot bio-inspiré que j'envisage de concevoir s'inspire du projet *MantaDroid* de la National University of Singapore. Ce type de robot doit répondre à plusieurs contraintes fonctionnelles liées à son environnement d'évolution et à son objectif de navigation autonome. La locomotion doit reproduire de façon réaliste le mouvement ondulatoire des nageoires pectorales de la raie manta, en générant une propulsion stable et efficace. L'étanchéité constitue une exigence primordiale : l'ensemble des composants électroniques, mécaniques et énergétiques embarqués doit être parfaitement protégé contre l'eau.

De plus, la forme générale du robot doit rester compacte et profilée afin de minimiser la traînée et d'optimiser la fluidité des déplacements sous l'eau. L'autonomie énergétique représente également une contrainte importante, le robot devant être capable de fonctionner pendant plusieurs dizaines de minutes sans intervention humaine. Il doit pouvoir être dirigé en vitesse et en direction tout en étant suffisamment agile pour effectuer des virages ou des changements de profondeur. Enfin, la conception doit permettre un entretien simplifié avec des composants modulaires et facilement remplaçables.

3.2 Critères de performance visés

Les performances attendues sont directement inspirées de celles atteintes par le prototype *MantaDroid*. Le robot doit pouvoir se déplacer à une vitesse comprise entre 0.7 et 1 mètre par seconde, grâce à une ondulation des nageoires à une fréquence modulable de 0.3 à 1.0 Hz. L'autonomie recherchée est d'au moins 10 minutes de fonctionnement continu, avec la possibilité d'étendre cette durée à 30 minutes selon la capacité énergétique embarquée.

Le rayon de giration visé est inférieur à 1.5 mètre, ce qui permet au robot d'évoluer dans des environnements restreints tout en conservant une bonne manœuvrabilité. L'appareil doit pouvoir maintenir une trajectoire stable sans nécessiter de corrections excessives et fonctionner silencieusement afin de ne pas perturber la faune marine. Il est également souhaité qu'il puisse résister à une immersion prolongée à une profondeur d'environ 3 mètres, notamment pour des tests en bassin ou en milieu naturel peu profond.

3.3 Synthèse des besoins

En synthèse, les besoins identifiés conduisent à un ensemble cohérent de spécifications techniques. Le robot devra être capable de reproduire le mode de nage ondulatoire de la raie manta avec une fidélité biomécanique suffisante pour produire une propulsion stable et continue. La structure devra intégrer des matériaux souples mais résistants, en particulier pour les nageoires, tout en garantissant une flottabilité proche de la neutralité.

Les actionneurs sélectionnés devront être à la fois compacts, légers et économes en énergie, permettant un mouvement régulier des nageoires. L'architecture embarquée devra comporter un microcontrôleur, une batterie Li-Po, un ensemble de capteurs inertIELS et des circuits de commande, le tout encapsulé dans un boîtier étanche assurant la protection des composants. Enfin, l'ensemble devra rester accessible et modulaire pour faciliter les phases de test, de maintenance et d'amélioration continue. L'objectif principal reste de privilégier la stabilité, l'agilité et l'endurance en accord avec les besoins d'observation, de surveillance ou d'exploration dans des environnements sous-marins.

Chapitre 4

Conception mécanique

4.1 Structure globale du robot

Le robot manta est conçu selon une architecture monobloc simplifiée, inspirée de la morphologie réelle de la raie manta. La structure principale se compose d'un corps central contenant l'électronique et les actionneurs, auquel sont fixées deux ailes pectorales souples destinées à reproduire la nage ondulatoire. La conception suit une approche modulaire afin de permettre un accès facile aux composants internes pour l'entretien, les réglages ou les améliorations.

Les proportions du robot sont établies à partir de dimensions biomimétiques. L'envergure totale du robot atteint environ 630 mm avec une longueur moyenne de 350 mm. Les ailes pectorales sont l'élément central de la propulsion et leur géométrie est directement dérivée de la raie naturelle. La Fig. 4.1 illustre les mesures utilisées pour la fabrication d'une aile souple, avec une longueur maximale de 194 mm et une hauteur de 200 mm.

4.2 Matériaux choisis (PVC, nylon PA12, etc.)

La sélection des matériaux joue un rôle essentiel dans l'équilibre entre souplesse, légèreté et durabilité du robot. Pour le corps principal, un polymère rigide comme le nylon PA12 (polyamide) est utilisé en raison de sa bonne résistance mécanique, de sa faible densité et de sa compatibilité avec l'impression 3D. Il est particulièrement adapté aux environnements humides et présente une excellente résistance à l'abrasion.

Les ailes flexibles, quant à elles, sont réalisées à partir de films de PVC souple de 0.3 mm offrant une élasticité suffisante pour permettre des mouvements ondulatoires tout en conservant leur forme initiale. Ces matériaux présentent également une bonne résistance à l'eau et au vieillissement.

Pour certains éléments structurels internes ou pour le boîtier d'étanchéité, des matériaux comme l'acrylique ou le polycarbonate peuvent également être utilisés, notamment pour leur transparence et leur facilité d'usinage.

4.3 Design des ailes flexibles

Le design des ailes constitue un aspect central de la propulsion bio-inspirée. Chaque aile est conçue pour suivre un profil incurvé similaire à celui observé chez les raies manta,

avec une extrémité affinée et un bord postérieur plus large. Les dimensions exactes de l'aile sont reprises dans la figure 4.1.

Les ailes sont fixées à des supports oscillants animés par les servomoteurs, qui sont eux-mêmes activés par le microcontrôleur situé dans le corps du robot. Ces supports transmettent un mouvement alternatif aux ailes, générant une onde qui se propage du haut vers les extrémités. Le choix d'une membrane souple permet d'imiter la déformation passive de l'aile, améliorant ainsi l'efficacité de la propulsion et la maniabilité du robot.

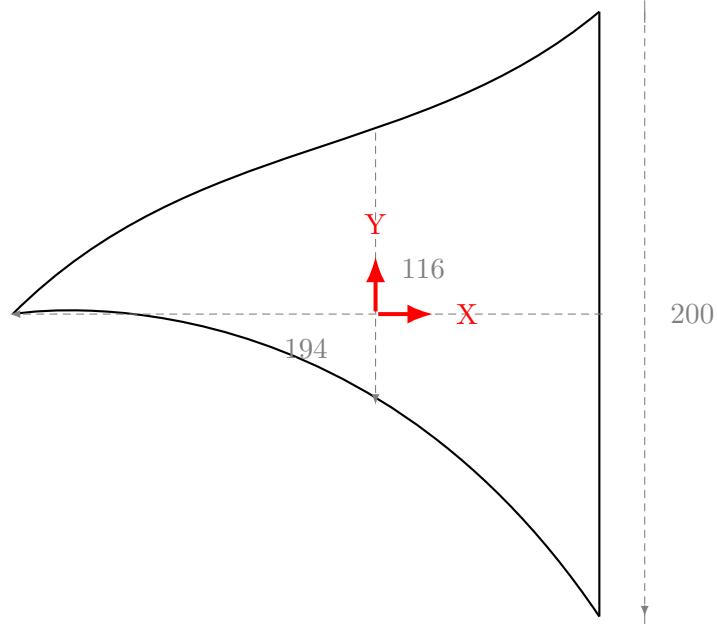


FIGURE 4.1 – Dimensions (en mm) de la nageoire pectorale pour le Robot Manta Ray

4.4 Étanchéité et boîtier

L'étanchéité du système est assurée par un boîtier central. Le boîtier contient la batterie, les circuits électroniques et les actionneurs, tous protégés par un compartiment hermétique.

Un soin particulier est apporté à l'interface entre les zones mobiles (aile-actionneur) et le compartiment étanche. Des paliers et soufflets étanches en silicone sont utilisés pour permettre la transmission du mouvement tout en empêchant toute infiltration d'eau.

Cette conception permet au robot de rester immergé pendant plusieurs dizaines de minutes sans risque de défaillance et garantit une grande fiabilité dans les phases de test en bassin.

Chapitre 5

Architecture électronique

5.1 Module WiFi ESP8266 et communication

Le module ESP8266 est un microcontrôleur WiFi intégré utilisé dans les projets embarqués pour sa compacité, son faible coût et ses capacités de traitement. Dans notre robot bio-inspiré, il assure la transmission des données vers une interface distante via le protocole HTTP ou MQTT. Il fonctionne en mode point d'accès pour permettre une connexion directe depuis un smartphone ou un ordinateur, ou en mode station pour rejoindre un réseau existant.

L'ESP8266 pilote les capteurs et servomoteurs, en exécutant des algorithmes de contrôle simples. Il permet le contrôle en temps réel de la propulsion du robot, la lecture des données environnementales et leur affichage sur une interface web embarquée accessible à distance. Sa fréquence de fonctionnement peut atteindre 80 MHz, suffisante pour les besoins du système.

5.2 Alimentation (9V, LiPo, régulateur LM2596)

L'autonomie du robot est assurée par une batterie LiPo (Lithium-Polymère) de 7.4V. Ce type de batterie offre un bon compromis entre densité énergétique, poids et compacité, essentiel pour un engin mobile sous-marin. La capacité choisie est de 2200 mAh, ce qui permet un fonctionnement continu de 30 à 45 minutes.

Le régulateur LM2596 joue un rôle essentiel en transformant la tension d'entrée en une sortie stable de 5V, nécessaire pour la plupart des composants (ESP8266, capteurs, servomoteurs). Il s'agit d'un régulateur à découpage (buck converter), très efficace, capable de supporter jusqu'à 3A. Il garantit une tension stable, indépendamment des fluctuations de charge dues à l'activité des moteurs ou des pics de consommation.

Des protections supplémentaires sont prévues : fusible, diode de roue libre et interrupteur principal pour assurer la sécurité électrique du système. Une LED permet de visualiser l'état de mise sous tension.

5.3 Capteurs (JSN-SR04T, MPU6050, MS5837, DHT22)

Le système embarque plusieurs capteurs destinés à caractériser l'environnement aquatique et à permettre une navigation intelligente :

JSN-SR04T : il s'agit d'un capteur ultrasonique à tête étanche, conçu pour des mesures de distance dans l'eau ou en environnement humide. Sa portée atteint jusqu'à 4.5 m ce qui est idéal pour la détection d'obstacles. Il envoie une onde sonore et mesure le temps de réflexion pour en déduire la distance.

MPU6050 : c'est un capteur inertiel IMU (Inertial Measurement Unit) combinant un accéléromètre 3 axes et un gyroscope 3 axes. Il permet d'estimer l'orientation du robot, sa vitesse de rotation et ses variations d'attitude. Ces données sont cruciales pour maintenir la stabilité de la trajectoire et corriger les déviations.

MS5837 : capteur de pression haute précision, spécialement conçu pour la mesure de profondeur dans les environnements sous-marins. Il peut mesurer jusqu'à 30 bars, soit plus de 300 m de profondeur, avec une grande précision (± 2 mbar). Il fournit une donnée essentielle pour contrôler l'immersion du robot.

DHT22 : ce capteur mesure la température et l'humidité. Il est placé dans le compartiment interne du robot pour surveiller les conditions thermiques internes. Une élévation anormale de température peut indiquer un problème de surchauffe ou d'étanchéité compromise.

L'ensemble de ces capteurs transmet ses données à l'ESP8266 via des bus sérialisés (I2C, UART ou 1-Wire). Les valeurs sont analysées, traitées, puis affichées sur une interface utilisateur, avec la possibilité de déclencher des alarmes ou de modifier le comportement du robot selon les seuils définis.

Composant	Fonction	Connexion
ESP8266	Communication WiFi	UART
MPU6050	Orientation / IMU	I2C (SDA/SCL)
JSN-SR04T	Distance avant	Trigger / Echo (Digital)
MS5837	Profondeur	I2C
DHT22	Température interne	Digital
Servomoteurs	Propulsion / nage	PWM (D3, D5)

TABLE 5.1 – Résumé des connexions électroniques principales

Chapitre 6

Programmation et contrôle

6.1 Gestion des servomoteurs

Les servomoteurs sont les principaux actionneurs responsables de la propulsion du robot bio-inspiré. Chacun est connecté à une nageoire pectorale souple, reproduisant ainsi le mouvement ondulatoire des raies manta. Le pilotage est réalisé via des signaux PWM (Pulse Width Modulation) générés par le microcontrôleur.

Chaque servomoteur reçoit un angle de consigne mis à jour en temps réel. Pour produire un mouvement fluide et régulier, on utilise une fonction sinusoïdale définie comme suit :

$$\theta(t) = \theta_0 + A \cdot \sin(2\pi ft) \quad (6.1)$$

Où :

- θ_0 est la position moyenne (souvent 90°)
- A est l'amplitude maximale (ex. 30°)
- f est la fréquence d'oscillation (ex. 0.5 Hz)

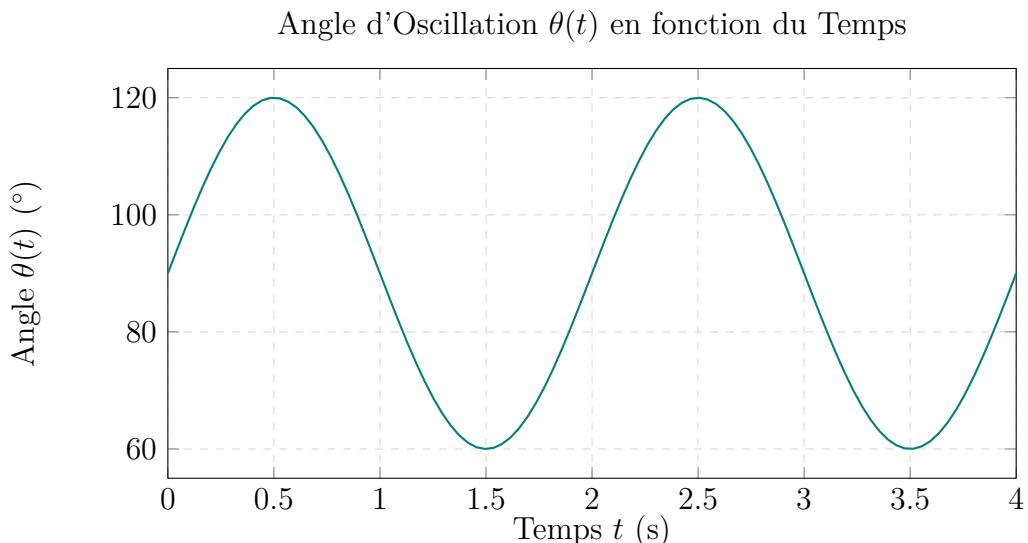


FIGURE 6.1 – Représentation de l'angle d'oscillation des ailes en fonction du temps, avec $\theta_0 = 90^\circ$, $A = 30^\circ$ et $f = 0.5$ Hz.

Les deux servomoteurs fonctionnent en opposition de phase, pour générer une propulsion alternative. En code Arduino, cela se traduit par :

```
int angle = 90 + 30 * sin(millis() / 1000.0);
servoGauche.write(angle);
servoDroit.write(180 - angle);
```

Ce type de commande simple est non bloquant et garantit une nage symétrique, stable et économique en énergie.

6.2 Lecture des capteurs

Les capteurs embarqués sont chargés de fournir des informations sur l'environnement sous-marin et les conditions internes du robot. Ils sont répartis comme suit :

- **MPU6050** : mesure de l'inclinaison, orientation et accélération (IMU 6 axes)
- **JSN-SR04T** : détection d'obstacles frontaux via ultrasons
- **MS5837** : mesure de pression pour estimer la profondeur d'immersion
- **DHT22** : température et humidité interne du compartiment électronique

Chaque capteur communique via un protocole spécifique : I2C pour MPU6050 et MS5837, digital pour DHT22 et JSN-SR04T. La lecture s'effectue toutes les 100 à 500 ms, selon l'importance et la variation attendue.

Un exemple de lecture I2C :

```
Wire.beginTransmission(0x68); // MPU6050
Wire.write(0x3B);
Wire.endTransmission(false);
Wire.requestFrom(0x68, 6);
int accX = Wire.read() << 8 | Wire.read();
```

Les données sont ensuite filtrées et stockées dans une structure globale pour être affichées ou envoyées à distance via WiFi.

6.3 Contrôle via WiFi

Le module ESP8266 permet de connecter le robot à un terminal externe (ordinateur ou smartphone) en créant un réseau local. Il héberge un serveur web léger, accessible via une interface HTML minimaliste.

Une fois connecté, l'utilisateur peut accéder à l'adresse IP locale du robot et voir une page de contrôle avec les boutons :

- Démarrer la nage
- Arrêter la nage
- Augmenter / réduire la fréquence
- Voir les données capteurs

Chaque action correspond à une requête HTTP GET interprétée dans le programme comme une commande. Exemple :

```
if (request.indexOf("/start") != -1) { active = true; }
if (request.indexOf("/stop") != -1) { active = false; }
```

Ce système permet un contrôle intuitif et immédiat, sans besoin de câblage ou de télécommande physique.

6.4 Algorithmes prévus

Trois boucles principales structurent le programme :

- **Boucle de propulsion** : met à jour les angles des servos en fonction du temps, produit un mouvement sinusoïdal déphasé.
- **Boucle capteurs** : lit périodiquement les capteurs, traite les valeurs, détecte des seuils critiques (ex. température trop haute, profondeur maximale).
- **Boucle communication** : écoute les requêtes HTTP, interprète les commandes, renvoie des données à l'utilisateur.

Les boucles sont non bloquantes, organisées avec des minuteries logicielles (`millis()`), ce qui permet une exécution fluide et parallèle des fonctions principales. En cas de surcharge ou de déconnexion, le robot conserve un mode automatique par défaut (rythme de nage lent, surveillance capteurs).

Ce schéma de contrôle permet un comportement hybride : semi-autonome avec commandes à distance, ou totalement autonome en l'absence de réseau

Chapitre 7

Planification des tests

7.1 Tests fonctionnels prévus

Les tests fonctionnels prévus pour le robot bio-inspiré visent à valider individuellement chaque sous-système avant l'intégration complète. Ces essais seront réalisés en plusieurs étapes, selon un protocole progressif en commençant à l'extérieur de l'eau jusqu'à des tests en eau contrôlée.

Le test des servomoteurs à vide consiste à vérifier le bon fonctionnement, la plage d'angle, le couple et la symétrie de mouvement. L'objectif est d'assurer une oscillation fluide et sans à-coups sur toute la plage prévue. Ce test est répété à différentes tensions d'alimentation pour simuler des variations de batterie.

Le test de lecture des capteurs s'effectue en mettant sous tension le robot et en lisant séquentiellement les valeurs pour chaque capteur. Les mesures doivent être stables, précises et cohérentes. Des tests de sensibilité sont également réalisés : inclinaison contrôlée pour l'IMU, pression simulée pour le MS5837, humidité et température variables pour le DHT22, obstacle positionné à distance connue pour le JSN-SR04T.

Le test d'étanchéité statique implique une immersion du boîtier non alimenté pendant 30 minutes dans une cuve d'eau douce. Après l'immersion, on ouvre et inspecte le compartiment électronique. L'absence de condensation ou d'infiltration d'eau valide ce test. Un second test dynamique est prévu lors de l'utilisation réelle en bassin.

Le test de communication WiFi vérifie la portée de connexion (au moins 5 mètres), la stabilité du signal, la rapidité d'ouverture de l'interface web embarquée et la transmission des commandes. Un test de déconnexion et reconnexion est aussi effectué pour simuler une perte temporaire de signal.

La simulation en eau peu profonde est réalisée dans un bassin ou aquarium de 1 à 2 mètres de long. Le robot est placé en immersion partielle puis totale. L'objectif est d'observer la réponse dynamique, la portance générée, l'équilibre et la réactivité aux commandes. Une analyse vidéo permet d'étudier la trajectoire et de quantifier le mouvement.

Chaque test est documenté avec des photos, vidéos, journaux de mesure et graphiques. Ces données permettent une comparaison entre les performances théoriques et expérimentales.

7.2 Mesures attendues

À l'issue des tests, plusieurs grandeurs physiques et fonctionnelles seront collectées. Ces indicateurs sont essentiels pour évaluer la conformité du robot aux spécifications

initiales.

L'amplitude réelle des ailes est mesurée à l'aide d'un capteur angulaire ou par analyse vidéo image par image. Elle est attendue entre 25° et 35°. Une amplitude trop faible limite la poussée, tandis qu'une amplitude excessive peut endommager les servomoteurs.

La fréquence de battement est mesurée en Hz par enregistrement de séquences et analyse temporelle. Elle doit pouvoir varier entre 0.5 et 1 Hz selon le mode sélectionné. Elle influe directement sur la vitesse et la consommation énergétique.

La vitesse de déplacement est mesurée sur une distance connue dans un bassin, par exemple 1 mètre. La vitesse visée est entre 10 et 20 cm/s. Elle dépend de l'accord entre la fréquence et l'amplitude des battements, ainsi que de l'équilibre hydrodynamique du robot.

L'autonomie est évaluée en testant le fonctionnement continu du robot jusqu'à décharge partielle de la batterie. On mesure l'autonomie utile, c'est-à-dire sans perte significative de performance. Une autonomie de 15 à 30 minutes est attendue.

La température interne est enregistrée en continu via le capteur DHT22. Elle doit rester sous 45°C en fonctionnement normal. Une température excessive est un indicateur d'étanchéité défaillante ou de surconsommation électrique.

La réactivité du WiFi est évaluée par la latence entre l'envoi d'une commande et son exécution visible sur le robot. Un délai inférieur à 500 ms est jugé satisfaisant. Des tests de stabilité sont réalisés sur 30 minutes de connexion continue.

La fiabilité des capteurs est contrôlée par des mesures répétées dans les mêmes conditions. Une variation inférieure à ± 5 pour cent est tolérée. Ce critère garantit la cohérence des données acquises pour une navigation ou un diagnostic fiable.

Ces mesures seront comparées aux spécifications initiales et permettront d'ajuster les paramètres mécaniques, électroniques ou logiciels avant une version définitive du robot.

Chapitre 8

Résultats attendus

8.1 Modélisation de la propulsion

La propulsion du robot bio-inspiré repose sur un mouvement ondulatoire contrôlé des ailes souples, mimant celui de la raie manta. Ce mouvement est généré par deux servomoteurs montés en opposition de phase, produisant une onde sinusoïdale qui se propage latéralement.

La poussée produite par cette oscillation peut être approximée par la relation suivante :

$$F \propto \rho \cdot S \cdot A^2 \cdot f^2 \quad (8.1)$$

où :

- ρ est la densité de l'eau ($\sim 1000 \text{ kg/m}^3$),
- S est la surface effective de l'aile en mouvement (en m^2),
- A est l'amplitude de battement (en m),
- f est la fréquence d'oscillation (en Hz).

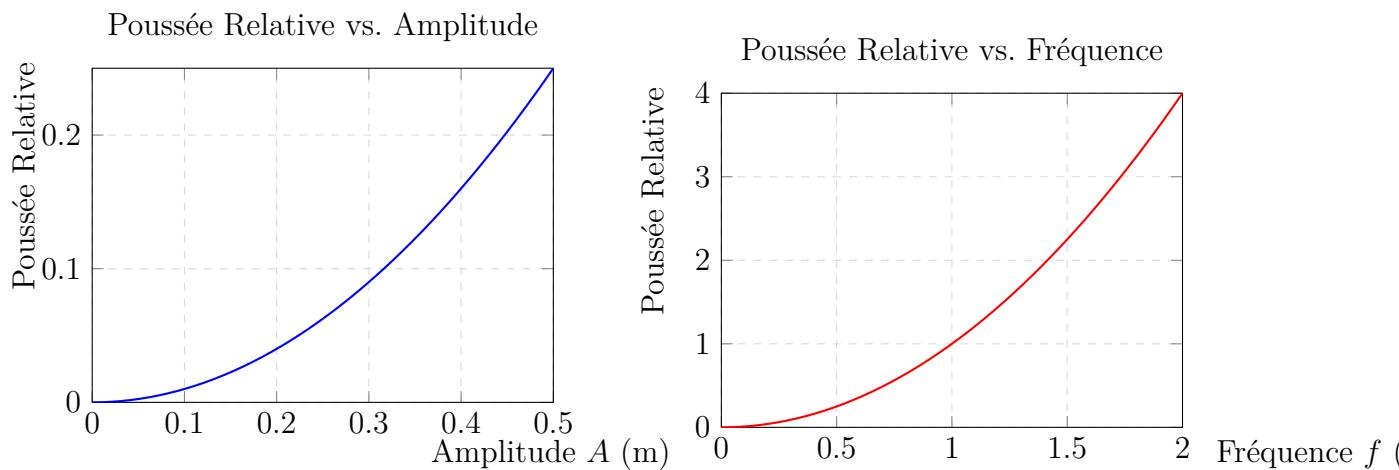


FIGURE 8.1 – Illustration de la dépendance quadratique de la poussée par rapport à l'amplitude et à la fréquence d'oscillation.

Cette équation montre que la poussée est fortement influencée par l'amplitude et la fréquence : une petite augmentation de l'un ou l'autre entraîne une augmentation quadratique de la force propulsive.

La propulsion dépend aussi de la rigidité de l'aile. Si elle est trop souple, l'aile se déformerait trop et la propulsion sera trop faible. Au contraire, si elle est trop rigide, alors l'aile ne se déformerait pas assez et le robot ne pourra pas avancer. Il faut réussir à trouver le compromis parfait.

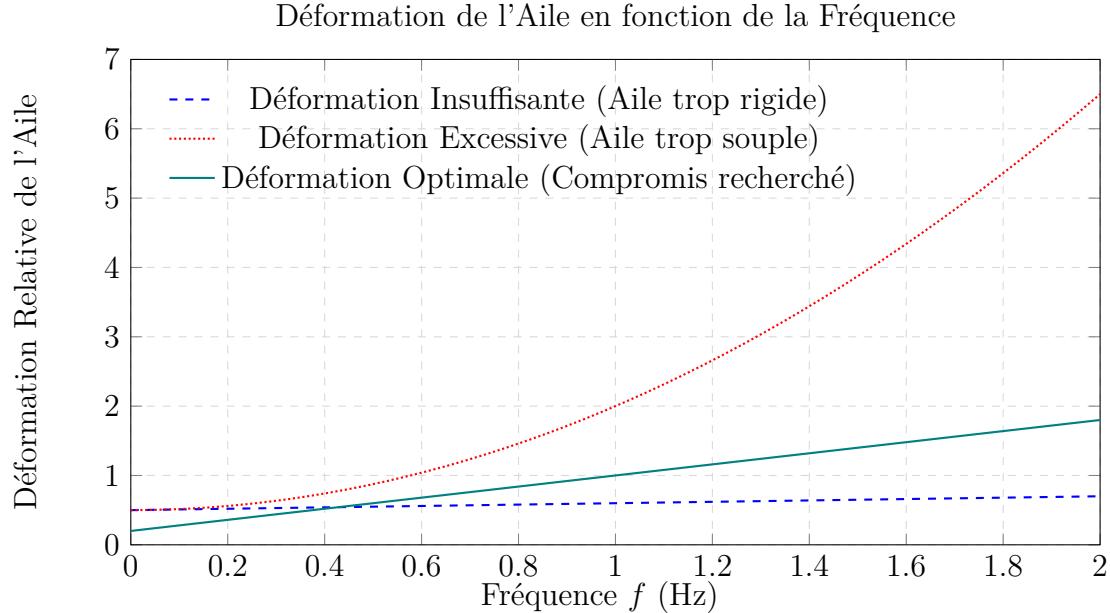


FIGURE 8.2 – Illustration conceptuelle de la déformation relative de l'aile en fonction de la fréquence.

8.2 Estimation de la vitesse

À partir des travaux existants sur des robots similaires (comme *MantaDroid*) et pour des paramètres standards ($A = 0.04$ m, $f = 0.8$ Hz), la vitesse attendue est de l'ordre de :

$$v \approx 0.1 \text{ à } 0.15 \text{ m/s} \quad (8.2)$$

Ce résultat est cohérent avec les performances observées dans d'autres projets biomimétiques. La vitesse est suffisante pour évoluer dans un environnement restreint comme un bassin, un aquarium ou une zone côtière peu profonde.

8.3 Fiabilité et consommation estimées

La fiabilité du système est cruciale pour des missions prolongées en milieu aquatique. Chaque composant a été choisi pour sa robustesse et sa documentation éprouvée dans l'écosystème Arduino.

- **Composants électroniques** : réputés stables dans le temps, résistants aux variations de tension, à condition d'une bonne étanchéité.
- **Étanchéité** : assurée par boîtier ABS, joints silicone RTV et pressurisation minimale. À tester en immersion prolongée.
- **Température** : surveillée en continu par le capteur DHT22. Une alarme logicielle est prévue en cas de dépassement de 45°C.

— **Consommation :**

- 2 servos : $2 \times 500 \text{ mA} = 1 \text{ A max}$
- ESP8266 : 100–150 mA
- Capteurs (MPU6050, MS5837, DHT22, JSN-SR04T) : 50–100 mA

Total : 1.2 A en fonctionnement normal ($\sim 9 \text{ W}$)

En fonctionnement réel, les pics de courant seront amortis par la régulation du module LM2596. La consommation globale permet une session prolongée sans échauffement excessif, à condition d'un bon refroidissement passif et d'une étanchéité maîtrisée.

Chapitre 9

Conclusion

Ce projet de conception d'un robot sous-marin bio-inspiré a permis d'explorer les différentes facettes de l'ingénierie appliquée à la robotique autonome et à la biomimétique. À travers l'étude approfondie de la raie manta, un modèle de locomotion aquatique naturel particulièrement efficace, il a été possible de transposer certaines caractéristiques clés dans une approche technique. Le choix des matériaux, la conception mécanique des ailes, l'architecture électronique, la stratégie de contrôle par signaux PWM et l'intégration des capteurs forment un ensemble cohérent et fonctionnel.

Même si le prototype n'a pas encore été fabriqué, le rapport détaille de manière rigoureuse les spécifications, les contraintes, les solutions retenues ainsi que les résultats attendus. L'ensemble de la démarche est fondée sur une logique d'optimisation et de fidélité au comportement réel de la raie manta, avec pour objectif d'atteindre un compromis entre simplicité de mise en œuvre et pertinence biomécanique. Les choix techniques réalisés reposent sur des composants disponibles, documentés et adaptés à une première version expérimentale.

Cette première itération du projet constitue une base solide pour une future mise en œuvre physique. Les perspectives d'amélioration sont nombreuses, notamment en termes de matériaux souples plus performants, d'actionneurs avancés, ou de traitement de données plus intelligent. À moyen terme, le robot pourrait évoluer vers un système semi-autonome, capable d'explorer de manière sûre et précise des environnements aquatiques peu profonds. Il représente également un support d'expérimentation et d'apprentissage utile, tant pour des applications académiques que professionnelles.

Ce travail met ainsi en évidence le potentiel offert par la robotique bio-inspirée pour concevoir des systèmes efficaces, économiques et adaptés à des environnements spécifiques. À l'interface entre la nature et la technologie, ce projet ouvre la voie à des réalisations concrètes alliant innovation, durabilité et utilité.

Bibliographie

- CHEW, Chee-Meng, Qing-Yuan LIM et K. YEO (déc. 2015). « Development of propulsion mechanism for Robot Manta Ray ». In : p. 1918-1923. DOI : 10.1109/ROBIO.2015.7419053.
- DHT22 Temperature and Humidity Sensor with Arduino* (s. d.). Arduino Project Hub / Community. URL : <https://arduinogetstarted.com/tutorials/arduino-dht22>.
- Getting Started with ESP8266 and Arduino IDE* (s. d.). Arduino (Community Resource). URL : <https://projecthub.arduino.cc/PatelDarshil/getting-started-with-nodemcu-esp8266-on-arduino-ide-b193c3>.
- HASAN, Kayes et al. (2024). « Oceanic Challenges to Technological Solutions : A Review of Autonomous Underwater Vehicle Path Technologies in Biomimicry, Control, Navigation, and Sensing ». In : *IEEE Access* 12, p. 46202-46231. DOI : 10.1109/ACCESS.2024.3380458.
- HE, Yichen, Guoming XU et Shunlong YANG (2020). « Design and Experiments with LoCO AUV : A Low Cost Open-Source Autonomous Underwater Vehicle* ». In : *arXiv preprint arXiv:2003.09041*. URL : <https://arxiv.org/pdf/2003.09041>.
- JSN-SR04T Ultrasonic Sensor with Arduino* (s. d.). Arduino Project Hub / Community. URL : <https://forum.arduino.cc/t/how-to-use-jsn-sr04t/609943>.
- LI, H. et al. (2024). « Kinematic and hydrodynamic analysis of a manta ray-inspired robot ». In : *ResearchGate*. URL : https://www.researchgate.net/publication/391866800_Kinematic_and_hydrodynamic_analysis_of_a_manta_ray-inspired_robot.
- LM2596 DC-DC Buck Converter Module with Arduino* (s. d.). Arduino Project Hub / Community. URL : <https://forum.arduino.cc/t/controlling-an-lm2596-board-with-arduino/691641>.
- MAHESHWARI, Vishal, George V. LAUDER et Frank E. FISH (2018). « Kinematics of swimming of the manta ray : three-dimensional analysis of open-water maneuverability ». In : *Journal of Experimental Biology* 221.6, jeb166041. DOI : 10.1242/jeb.166041. URL : <https://jeb.biologists.org/content/221/6/jeb166041>.
- MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET DE LA COHÉSION DES TERRITOIRES (2023). *Le biomimétisme*. <https://www.ecologie.gouv.fr/biomimetisme>.
- MPU-6050 Accelerometer and Gyroscope with Arduino* (s. d.). Arduino Project Hub / Community. URL : <https://forum.arduino.cc/t/getting-started-with-the-mpu6050-beginner-friendly-guide-with-visual-explanations/1364064>.
- MS5837 Pressure Sensor Arduino Library* (s. d.). GitHub (SparkFun Libraries). URL : <https://forum.arduino.cc/t/ms5837-pressure-sensor-library-by-bluerobotics/953390>.