

Prototype d'un robot hybride de navigation multi-milieus : propulsion ondulatoire et voiles

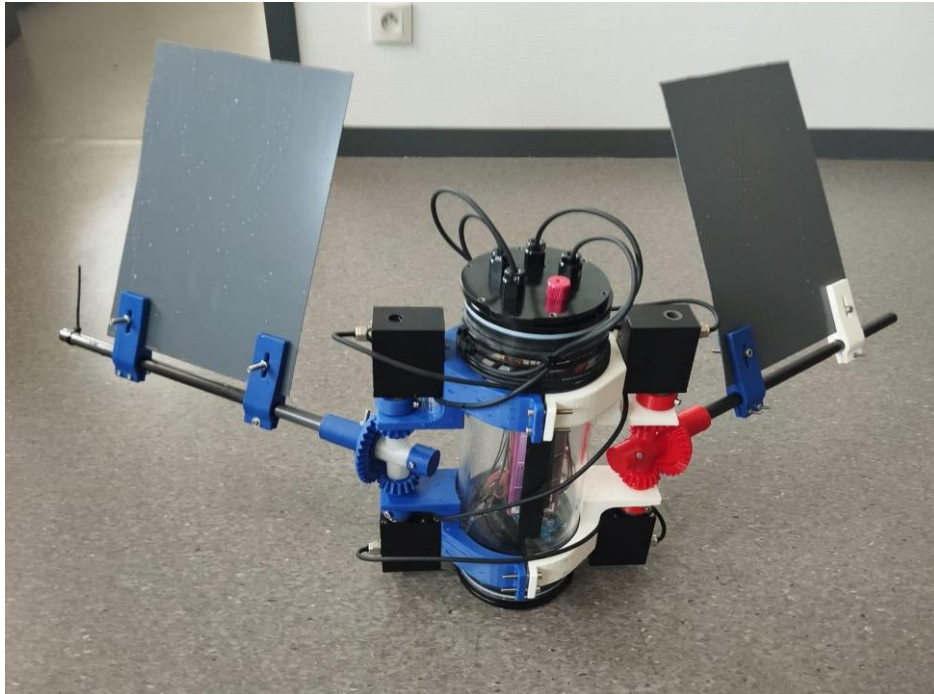


Figure 1 : Robot raie-voilier

Ce rapport s'inscrit dans le cadre de ma première année du Master Robotique Aquatique Mobile de l'ENSTA (École nationale supérieure de techniques avancées) Bretagne. Il présente les travaux menés lors d'un stage réalisé au sein du laboratoire de recherche STIC (Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Information, de la Communication et de la Connaissance), à Brest, sous la supervision de Loick Degorre et Lionel Lapierre. Ce stage porte sur le développement d'un prototype de robot bio-inspiré capable d'évoluer dans deux environnements distincts : en surface, à la manière d'un voilier, et sous l'eau, par nage ondulatoire inspirée des raies.

L'objectif principal de ce travail était de concevoir, fabriquer et tester un système capable de combiner ces deux modes de locomotion dans un même robot. L'approche retenue est bio-inspirée, dans le sens où elle s'appuie sur des principes naturels de déplacement, sans chercher à reproduire fidèlement une morphologie existante.

Ce travail avait pour but de déterminer si un prototype fonctionnel combinant ces deux modes de déplacement pouvait constituer une base pertinente pour un développement plus poussé. Une attention particulière a été portée à la conception mécanique, en intégrant dès le départ une contrainte de fabrication locale : toutes les pièces du robot devaient être réalisables via impression 3D ou usinage CNC, en utilisant les moyens disponibles sur place.

Le présent document retrace l'ensemble des étapes de développement, depuis la conception mécanique initiale jusqu'aux expérimentations finales en milieu aquatique. Il détaille également l'architecture électronique embarquée, les choix logiciels effectués (communication, contrôle des moteurs), ainsi que les observations et pistes d'amélioration identifiées à l'issue des essais en bassin.

1. Prototypage physique du Robot raie-voilier

1.1 Conception mécanique de l'épaule

Le développement du robot raie-voilier a débuté par le prototypage mécanique de ses deux épaules, placées symétriquement de part et d'autre du tube principal. Inspirée de la nage ondulatoire des raies, cette conception s'inscrit dans une démarche bio-inspirée visant à exploiter les principes naturels de propulsion grâce à des ailes.

Matériaux et composants à disposition

Le corps central du robot est constitué d'un tube étanche en polycarbonate de 4 pouces de diamètre et de 30 cm de longueur, fourni avec ses deux embouts ("end caps") et brides ("flanges") compatibles de marque Blue Robotics. Le montage a été réalisé selon les recommandations du [Watertight Enclosure User Guide](#), garantissant une bonne étanchéité.

L'actionnement des ailes repose sur quatre servomoteurs étanches Rovmaker RM-SV-40, répartis équitablement sur les deux épaules. Les ailes ont été découpées dans des plaques de PVC de 1 mm d'épaisseur. Afin d'optimiser l'adhérence entre les pièces imprimées en 3D et le tube central, des bandes de caoutchouc de 1,5 mm ont été utilisées comme interface souple.

Remarque importante : Toutes les pièces imprimées en 3D doivent impérativement respecter les paramètres définis dans la photo "**parametres_impression**", notamment avec un remplissage à 80 % et avec un motif gyroïde, afin d'assurer une bonne résistance mécanique. Il est également essentiel de veiller à l'orientation correcte des pièces comportant des engrenages lors de l'impression : les dents doivent impérativement être orientées vers le haut, pour garantir une meilleure précision et robustesse de l'ensemble.

Conception de l'épaule

Chaque épaule est conçue pour offrir deux degrés de liberté, dans le but d'explorer une large gamme de configurations tout en limitant la complexité mécanique. Le principe de rotation utilisé s'inspire du mécanisme présenté par *thang010146* dans sa vidéo YouTube intitulée "*Controlling pan and tilt rotation of an object*".

Les pièces de liaison entre les épaules et le tube central reprennent les principes des *clamps* Blue Robotics, assurant une fixation solide. Le montage complet est documenté dans le fichier d'assemblage "**robot_raie_voilier**", qui répertorie l'ensemble des éléments mécaniques nécessaires, à l'exception de l'électronique, du câble de communication (tether 7 fils), des matériaux d'étanchéité et du filament d'impression 3D.

Améliorations mécaniques

Dans une première version, le mécanisme original a été simplifié par la suppression des courroies, remplacées par un contact direct entre pièces imprimées. Bien que ce système ait montré un fonctionnement correct, il s'est avéré trop fragile pour supporter des efforts importants.

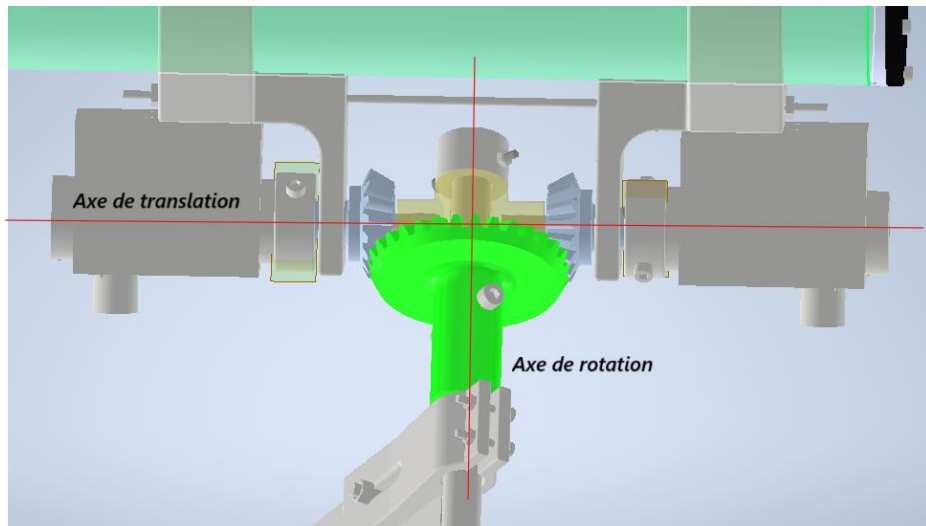


Figure 2: Axes de liberté de l'épaule

Plusieurs évolutions ont donc été intégrées pour renforcer la robustesse du système :

- **Renforcement de l'axe de rotation** : l'utilisation du **tube en fibre de carbone**, qui sert de point d'attache des ailes, comme axe de rotation a permis de mieux supporter les charges mécaniques induites par le mouvement des ailes.
- **Renforcement de l'axe de translation** : deux pièces en acier ont été ajoutées pour assurer une liaison rigide entre l'axe central et les engrenages commandés par les servomoteurs.

Pour une version allégée sans usinage mécanique, il est possible d'utiliser la pièce **"engrenage_secondaire_V2"**, moins robuste, en remplacement de la version actuelle **"engrenage_secondaire_V3"**.

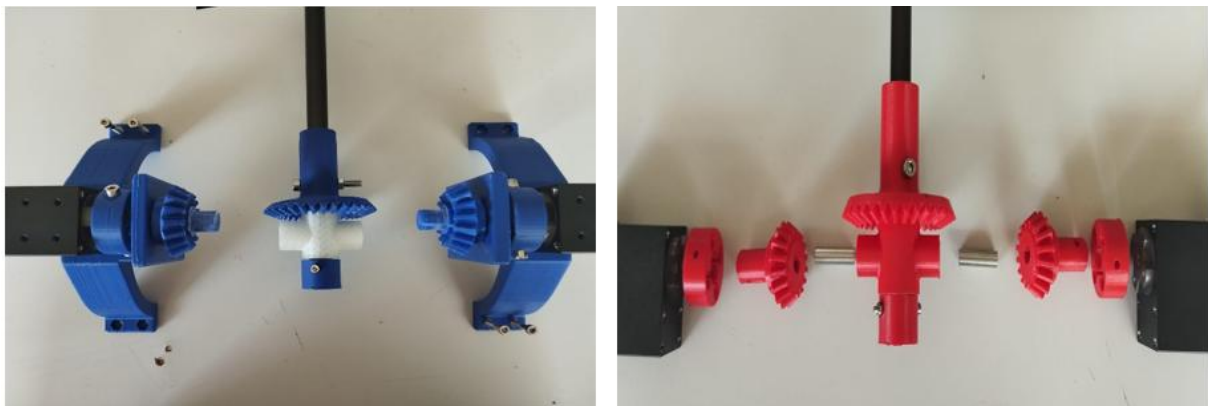


Figure 3 : Evolution de l'épaule pour son renforcement

Ces modifications ont abouti à une structure mécanique plus fiable et résistante aux chocs, en particulier au niveau de la liaison entre les ailes et les servomoteurs.

Enfin, le fichier **"Etapas_de_montage"** fournit une procédure détaillée pour l'assemblage du robot de manière reproductible.

1.2 Architecture électronique

Le système étant conçu pour fonctionner en autonomie, l'alimentation est assurée par **deux batteries LiPo 3S (11,1 V)**, utilisées pour dissocier les alimentations des sous-systèmes et améliorer la fiabilité globale :

- Une **batterie LiPo 3S – 2,2 Ah** alimente la partie **électronique de contrôle**, constituée d'une carte **Arduino Mega** couplée à son **shield Ethernet**.
- Une **batterie LiPo 3S – 5 Ah** est dédiée à l'alimentation des **quatre servomoteurs étanches Rovmaker**.

Il est essentiel de connecter toutes les masses électriques entre elles pour assurer une référence de signal cohérente, notamment entre la carte de commande et les actionneurs.

L'étanchéité des passages de câbles entre l'intérieur du tube et l'extérieur est assurée par des **pénétrateurs WetLink de 5,5 mm** pour les fils des moteurs. Le **tether de 7 fils**, utilisé pour la communication externe, passe quant à lui par un pénétrateur étanche de **7,5 mm**.

Ces composants garantissent une parfaite étanchéité de la partie immergée tout en assurant la fonctionnalité des câbles de commande et de communication. Leur montage suit les instructions officielles de Blue Robotics ([WetLink Penetrator Installation Guide – Blue Robotics](#)).

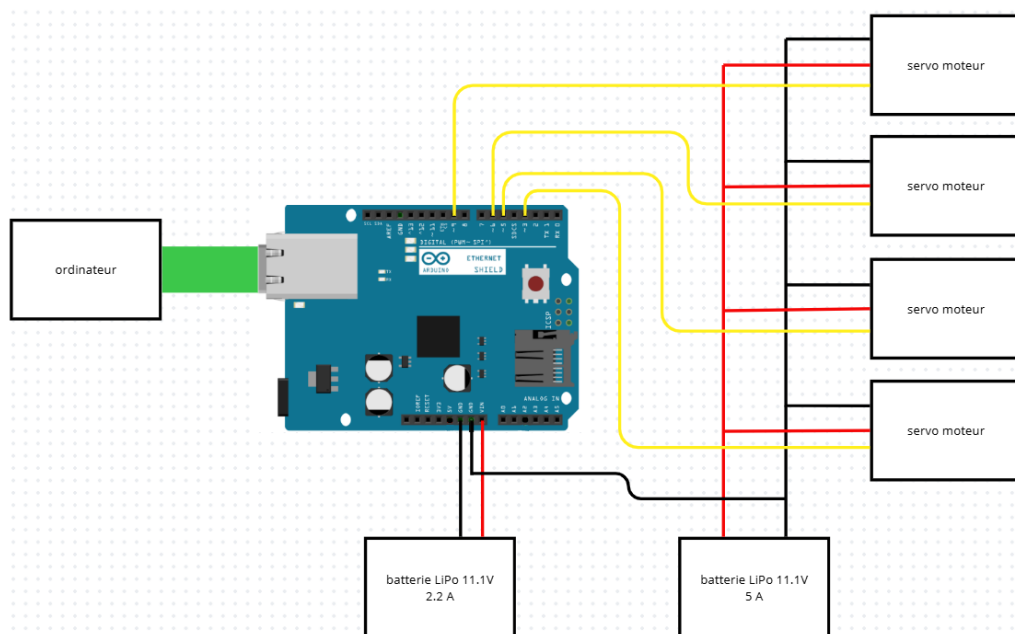


Figure 4 : Schéma électrique du robot

2. Communication et algorithmique embarqués dans le robot raie-voilier

2.1 Architecture algorithmique

Le développement logiciel du robot raie-voilier a été entièrement réalisé en **C++**, en s'appuyant sur l'environnement **PlatformIO** intégré à **Visual Studio Code**, afin de bénéficier d'un cadre de développement modulaire, compatible avec les microcontrôleurs de type **Arduino Mega 2560**.

L'architecture logicielle repose sur une organisation orientée objet, articulée autour de trois classes principales. Chaque classe remplit un rôle spécifique dans la commande des actionneurs et la gestion de la communication réseau :

Classe Differential

Cette classe constitue la brique de base du contrôle d'une épaule seule. Elle encapsule la logique de génération de signaux pour les servomoteurs étanches, permettant la création de mouvements ondulatoires paramétrables (amplitude, fréquence, phase). Cette structure logicielle a été initialement développée dans un objectif de prototypage rapide, afin de valider les comportements mécaniques élémentaires d'une aile avant l'intégration dans un système plus complexe.

De plus, la classe permet de tester différentes stratégies de locomotion inspirées des nageoires pectorales de la raie, notamment via des profils sinusoïdaux modulables.

Classe DifferentialGroup

Pour permettre la commande synchronisée des deux épaules du robot, une composante logicielle spécifique a été développée : la classe *DifferentialGroup*. Celle-ci regroupe deux instances indépendantes de la classe *Differential*, chacune correspondant à une aile, et fournit une interface centralisée permettant de piloter leurs mouvements de manière coordonnée.

Cette structure logicielle permet d'implémenter facilement des comportements symétriques (comme des battements d'ailes en miroir) ou asymétriques (par exemple pour induire une direction). Elle joue un rôle essentiel dans la gestion des mouvements complexes, en garantissant une cohérence temporelle et fonctionnelle entre les deux actionneurs.

La classe *DifferentialGroup* intègre également des fonctions d'initialisation, de calibration, et de synchronisation, assurant que les deux modules répondent correctement aux paramètres définis, qu'ils soient prédéfinis ou transmis dynamiquement via la communication réseau.

Classe DifferentialServer

Enfin, la gestion de la communication réseau est assurée par la classe *DifferentialServer*. Celle-ci met en œuvre un serveur TCP/IP embarqué sur l'Arduino, configuré pour recevoir des commandes externes via **liaison Ethernet**. Elle assure la réception, l'interprétation, et le routage des messages vers les fonctions correspondantes du système de commande.

Cette approche permet une séparation claire entre les couches **réseau**, **logique de commande**, et **pilotage matériel**, facilitant la maintenance, la réutilisation et l'extension future du code embarqué.

Fichier *main.cpp*

Le fichier principal du projet (*main.cpp*) agit comme orchestrateur du système. Il initialise les objets des différentes classes, configure les entrées/sorties matérielles, et exécute la boucle principale du programme. Cette dernière repose sur un mécanisme d'**écoute passive**, en attente de paquets réseau, permettant de réagir dynamiquement aux instructions utilisateur.

2.2 Méthode de communication

Choix de la technologie

La communication entre l'utilisateur et le robot a été mise en œuvre via une **liaison Ethernet filaire**, à travers un **tether 7 fils** étanche connecté au **shield Ethernet** de la carte Arduino Mega 2560. Ce choix technologique a été guidé par des considérations de robustesse, de simplicité de mise en œuvre, et d'interopérabilité avec les outils de diagnostic réseau existants.

Fonctionnement général

Le protocole de communication repose sur **TCP/IP**, avec une architecture **client-serveur** dans laquelle le robot agit comme serveur. Le fonctionnement général peut être résumé en plusieurs étapes :

1. **Initialisation réseau**

Lors de la mise sous tension, le robot initialise son interface réseau avec une **adresse IP statique** (par exemple, 192.168.1.177) et ouvre un port d'écoute (par défaut le port 80). Le système est alors prêt à recevoir des requêtes entrantes.

2. **Configuration du poste utilisateur**

L'ordinateur de commande doit être connecté directement au tether. Une configuration réseau manuelle est nécessaire :

- IP : 192.168.1.1
- Masque : 255.255.255.0
- Passerelle : 192.168.1.1

Cette configuration permet de placer les deux dispositifs dans le même **sous-réseau local**, éliminant le besoin d'un routeur ou d'un service DHCP.

3. **Envoi des commandes**

Les commandes sont envoyées sous forme de **chaînes de caractères** via la commande 'curl', ou via des scripts utilisant ce protocole. Le fichier « **commandes.txt** » fourni regroupe les exemples de commandes utilisables.

4. **Traitement embarqué**

Les messages reçus sont interprétés par *DifferentialServer* pour en extraire les instructions correspondantes (ex. démarrage, arrêt, changement de fréquence), puis transmis à la classe *DifferentialGroup* pour exécution.

5. **Retour d'informations (futur développement)**

Bien que non encore pleinement implémentée, la structure actuelle permet le retour de messages de diagnostic ou de confirmation vers l'utilisateur. Cette fonctionnalité ouvre la voie à la mise en place future d'interfaces de supervision graphique ou de télémétrie en temps réel grâce à l'implémentation de capteurs sur le robot.

3. Analyse critique et perspectives d'amélioration

3.1 Observations générales

Les premiers essais fonctionnels du robot ont été réalisés au sein du bassin de test du laboratoire, à l'aide de la version finale du prototype. Deux campagnes d'essais ont été menées, permettant d'évaluer le comportement du système dans différents états d'équilibrage et sous différentes sollicitations mécaniques.

Lors de ces tests, plusieurs constats ont pu être établis concernant la stabilité, la réponse mécanique du système, et la capacité de déplacement dans le milieu aquatique.

Flottabilité et équilibre

Dans sa configuration initiale, le robot présente une flottabilité importante, conduisant à un déséquilibre latéral (droite-gauche), notamment du fait que les moteurs sont en grande partie situés hors de l'eau. Ce déséquilibre nuit à la stabilité en surface et rend les essais moins représentatifs.

Sur l'axe longitudinal (avant-arrière), la stabilité du robot dépend fortement de la position des épaules sur le tube central. Or, ce réglage est délicat à ajuster avec précision, et constitue un point limitant pour obtenir un comportement stable sans système actif de correction.

Deux états du robot ont été testés afin de comparer leurs effets sur la stabilité et le déplacement :

- **État 1** : Robot sans lest additionnel. Flottabilité très élevée, avec un niveau d'immersion correspondant à la moitié du corps. Légère instabilité vers l'arrière.
- **État 2** : Robot avec ajout de poids internes. Flottabilité importante mais assez faible pour permettre l'immersion via un actionnement moteurs. Niveau d'eau situé aux trois quarts du corps. Instabilité déplacée vers l'avant.

Ces deux configurations ont permis de mieux comprendre l'influence du centre de masse et du volume immergé sur la dynamique du robot.

Comportement mécanique et limites des actionneurs

D'un point de vue mécanique, l'ensemble du système s'est montré **fonctionnel et résistant aux efforts appliqués** durant les tests. Néanmoins, il a été observé que dans certaines conditions de charge, **les moteurs semblent légèrement dévier de leur position cible**, comme si un delta angulaire était appliqué pour limiter la contrainte et éviter la casse mécanique. Cette observation suggère que les moteurs atteignent leur limite de couple et ne peuvent maintenir leur consigne face à une opposition trop importante. Une étude approfondie serait nécessaire pour évaluer la puissance réelle disponible et l'efficacité de l'actionnement dans différents régimes.

Également, en configuration de nage ondulatoire (type raie), le robot présente une légère tendance à dériver du côté du tether de communication, probablement en raison de la traînée induite par celui-ci.

Évaluation des schémas de mouvement

Plusieurs profils de commande ont été testés afin d'évaluer les performances du robot dans différentes configurations d'excitation (fréquence, amplitude, combinaison des axes). Chaque essai a été noté sur une échelle de 0 à 10, où 0 représente un déplacement nul ou non contrôlé, et 10 un déplacement fluide, continu, et approximativement rectiligne.

Les résultats des tests sont présentés dans le tableau suivant :

Courbe de mouvement des ailes		Etat 1	Etat 2
Sinusoïde en translation	Basse fréquence / amplitude moyenne (40°)	Déplacement propre avec une avancée correcte grâce à la déformation de l'extrémité interne de l'aile. (8/10)	Déplacement difficile avec le mouvement du corps dû à la poussée des ailes. La force étant transmise dans le corps (sous forme d'oscillation dans le sens de la longueur), les ailes ne se déforment pas, ce qui ne permet pas d'avancer. (1.5/10)
	Voies d'améliorations	Mettre une aile plus souple pour permettre une meilleure poussée.	Modifier les ailes (plus petites ou bien plus souples) ou stabiliser le corps (alourdir ou rajouter une quille) pour que la force entraîne un déplacement.
	Haute fréquence / basse amplitude (20°)	Déplacement saccadé avec beaucoup de perte d'énergie pour peu de déplacement. (4.5/10)	Déplacement présent mais pas optimum. Le corps n'ayant pas le temps de dépenser l'énergie transmise par les ailes dû à la haute fréquence, l'ensemble se déplace. Le robot a réussi à plonger certaines fois malgré une flottabilité non neutre. (6/10)
	Voies d'améliorations	Ailes moins élastiques pour permettre une meilleure poussée.	Alourdir le corps pour une plus faible perte d'énergie.
Sinusoïde en translation + rotation (25°) <i>Remarque : à haute amplitude de rotation, le système ne retransmet pas bien les force et les mouvements ne permet pas le placement.</i>	Basse fréquence / amplitude translation moyenne (40°)	Déplacements très faibles et partiellement aléatoires. Grande perte d'énergie avec le déplacement du corps dans le sens de la longueur. (2/10)	Très peu de déplacement avec toute la force perdue par l'oscillation du corps. (3/10)
	Voies d'améliorations	Stabiliser le corps avec une quille ou des flotteurs si on veut un mouvement à la surface de l'eau.	Stabiliser le corps (alourdir ou rajouter une quille) ou redimensionner les ailes (plus petites ou bien plus souples) pour permettre une meilleure transmission des forces pour le déplacement.

	Haute fréquence / basse amplitude de translation (20°)	Mouvement quasiment nul et non orienté. Mouvement de l'ensemble dans tous les sens. (1/10)	Déplacement partiellement (3.5/10) faible et chaotique.
--	--	--	---

Les essais ont mis en évidence une **forte variabilité des performances selon les états du robot et les paramètres d'entrée**. On note notamment que :

- En mode **sinusoïde purement translationnel**, des déplacements significatifs ont pu être obtenus en **basse fréquence et amplitude moyenne**, particulièrement en État 1 (8/10). Toutefois, ce mouvement devient moins efficace en État 2, où les oscillations longitudinales du corps absorbent l'énergie, empêchant les ailes de se déformer correctement (1.5/10).
- Les profils à **haute fréquence et faible amplitude** génèrent des déplacements plus chaotiques, souvent avec des pertes d'énergie importantes dues à la raideur du système (résultats entre 4 et 6/10 selon l'état).
- En ajoutant une **composante rotative aux mouvements des ailes**, les performances se sont globalement dégradées, en raison d'une mauvaise transmission des forces au corps du robot. Les déplacements sont alors faibles, désordonnés, voire inexistant dans certains cas.

Malgré des performances perfectibles, ces essais ont permis de valider le **principe fonctionnel du système hybride**, avec un **déplacement mesurable à la fois en surface et en immersion**. Le système reste toutefois perfectible, notamment sur le plan de la stabilité passive, de l'optimisation de la poussée des ailes, et de la configuration des masses.

Remarques sur le mode voilier

Bien que les essais n'aient pas encore été menés dans un scénario complet de navigation en surface (type voilier), il a été vérifié que le robot est capable de relever les ailes et de les orienter. Cependant, on observe un enfoncement du corps d'environ 5 cm sous la ligne de flottaison, ce qui entraîne une instabilité modérée. En l'absence de perturbations, le robot reste partiellement stable en statique, mais l'ensemble reste à affiner avant des essais dynamiques avec vent simulé ou propulsion par voile.

3.2 Axes d'amélioration

À l'issue des essais réalisés, plusieurs pistes d'évolution ont été identifiées, tant sur le plan matériel que fonctionnel. Ces propositions visent à améliorer la stabilité, l'efficacité de la propulsion ainsi que la maniabilité du robot dans ses différents environnements (surface, immersion partielle, pleine immersion).

Évolution du système matériel

L'ajout d'un **ballast contrôlable** constitue la principale amélioration envisagée à court terme. Il permettrait de gérer dynamiquement la profondeur et la flottabilité du robot, offrant ainsi une plus grande liberté de manœuvre. Toutefois, cet ajout impliquerait un déséquilibre de masse, qui devra être compensé soit par une masse amovible symétriquement opposée au ballast, soit par un système de volant d'inertie. Il peut aussi être envisageable d'exploiter ce déséquilibre pour induire une inclinaison contrôlée vers l'avant ou l'arrière, potentiellement utile à la propulsion.

Une autre évolution importante consisterait à remplacer la **liaison filaire (tether)** par un système de **communication sans fil** (radio ou acoustique), afin de supprimer les contraintes induites par la traînée du câble à l'arrière. Si cette liaison reste indispensable, il conviendrait au minimum de **centrer le tether sur la partie arrière du robot** (notamment via la "tape" prévue à cet effet), afin que sa résistance se traduise uniquement par un ralentissement global et non par une perturbation de la trajectoire.

En ce qui concerne la structure existante, les **clamps** fixant les épaules pourraient être **usinées en plusieurs parties** afin d'améliorer leur rigidité et leur durabilité. À ce jour, les engrenages imprimés en 3D ne présentent pas de signes de faiblesse, mais une version usinée pourrait à terme garantir une fiabilité accrue en conditions extrêmes.

Optimisation de la propulsion

L'analyse des essais en bassin a montré que le **mouvement ondulatoire de grande amplitude à basse fréquence** (notamment en État 1) générerait un déplacement efficace en surface, en tirant parti de la **déformation naturelle des ailes**. À l'inverse, en immersion (État 2), le déplacement était meilleur avec des **battements rapides de faible amplitude**, car le corps du robot absorbait moins l'énergie transmise.

Ainsi, une fois la **stabilité longitudinale** assurée (via quille, ballast ou fuselage), il pourrait être pertinent de privilégier des ailes plus souples, capables de se déformer davantage pour amplifier le mouvement ondulatoire à basse fréquence, comme observé chez certaines espèces de raies. En fonction des résultats, un redimensionnement des ailes (en réduisant ou augmentant leur surface) pourrait aussi être envisagé.

Recherche de stabilité

Quel que soit le mode de fonctionnement – en surface, partiellement immergé ou complètement sous l'eau – la **stabilité du corps** reste un facteur déterminant. L'ajout d'un **fuselage** ou d'une **quille** pourrait fortement contribuer à stabiliser l'ensemble, tant en roulis qu'en tangage, facilitant ainsi la propulsion rectiligne.

Enfin, une **modification de la géométrie du robot** pourrait être bénéfique : **reculer la base des épaules** sur le corps, tout en ajoutant une **masse à l'avant**, permettrait de déplacer le centre de poussée vers l'arrière, et donc de mieux stabiliser la direction et l'efficacité de la propulsion.

Conclusion

Ce projet s'inscrit dans une démarche visant à concevoir un robot bio-inspiré capable de se déplacer efficacement à la fois sous l'eau, en imitant les mouvements d'une raie, et en surface, à la manière d'un voilier. L'ensemble du travail mené au cours de ce stage a permis de poser les bases d'un prototype fonctionnel, tout en respectant les contraintes de fabrication locale et de simplicité mécanique.

La phase de conception a abouti à une structure robuste, imprimable en 3D, intégrant des épaules à deux degrés de liberté permettant une large variété de mouvements. L'architecture électronique, embarquée et autonome, a été pensée pour être modulaire et adaptable à différents modes de fonctionnement. Une attention particulière a été portée à l'optimisation mécanique : plusieurs itérations ont été nécessaires pour améliorer la résistance des engrenages et l'efficacité du montage, jusqu'à obtenir un système suffisamment solide pour supporter les efforts générés par les phases de propulsion.

Les essais réalisés en bassin ont permis d'évaluer le comportement du robot dans deux états distincts : avec et sans lest. Ils ont mis en évidence plusieurs configurations de battement d'ailes, montrant que certains paramètres comme la fréquence, l'amplitude et la souplesse des ailes influencent fortement le déplacement obtenu. Bien que le robot ne se déplace pas encore de manière autonome, les tests ont montré qu'un mouvement cohérent et exploitable est atteignable. Dans certaines conditions, des déplacements fluides et réguliers ont été observés, démontrant la faisabilité d'une locomotion efficace sous l'eau. La stabilité du robot reste toutefois à améliorer, notamment sur le plan longitudinal et latéral, en lien avec le placement des moteurs, l'équilibre général et la forme du corps.

Ces observations ont permis de faire émerger plusieurs axes d'amélioration :

- L'ajout d'un système de ballast permettrait de contrôler activement la flottabilité et la profondeur du robot.
- Un changement de système de communication (pour remplacer le tether filaire) pourrait réduire les perturbations sur la trajectoire et améliorer la maniabilité, notamment en surface.
- Le renforcement des pièces mécaniques, notamment par usinage ou redécoupage des clamps, permettrait d'augmenter la durabilité à long terme.
- Un ajustement de la géométrie (recul des ailes, ajout de fuselage ou de quille) pourrait aider à améliorer la stabilité et l'efficacité de la propulsion.
- Enfin, le choix de matériaux plus souples ou le redimensionnement des ailes pourrait optimiser la poussée dans des conditions spécifiques, comme une nage ample à basse fréquence, qui semble être la plus prometteuse pour ce type de déplacement.

En conclusion, le prototypage s'est avéré concluant. Le robot a montré qu'il pouvait déjà fonctionner efficacement en tant que raie, avec un comportement stable et des performances intéressantes dans certaines configurations. Même si sa fonction de voilier n'a pas encore pu être entièrement testée, les résultats obtenus ouvrent de réelles perspectives. Il serait pertinent de poursuivre le développement du système vers un prototype plus abouti, intégrant une meilleure stabilisation, un contrôle autonome et une optimisation fine des paramètres mécaniques. Ce robot pourrait ainsi devenir une plateforme expérimentale polyvalente, adaptée à l'exploration ou à la surveillance en milieu aquatique.