

Parcours : Innovation pour l'industrie

RAPPORT DE PROJET - SYSTÈME DE RAMES SYNCHRONISÉES.



SOMMAIRE

| | |
|---|-----------|
| Partie 1 - Introduction | 3 |
| 1.1 - Contexte global | 3 |
| 1.2 - Contexte technique | 4 |
| 1.2.1 - Identification de la phase de vie du produit | 4 |
| 1.2.2 - Diagramme des milieux extérieurs | 5 |
| 1.2.3 - Cahier des charges | 6 |
| 1.3 - Etat de l'art | 7 |
| Solution n°1 : Mécanisme bielle-manivelle | 7 |
| Solution n°2 : Mécanisme poulie-courroie | 8 |
| Solution n°3 : Modèle expérimental de bateau dynamique | 8 |
| 1.4 - Choix de la solution | 9 |
| Schémas de principes | 9 |
| Tableau de déclassement | 11 |
| Partie 2 - Développement solution technique | 12 |
| 2.1 - Méthodes utilisées | 12 |
| 2.1.1 - Analyse cinématique | 13 |
| 2.2.2 - Conception CAO | 19 |
| 2.2 - Gestion de projet | 26 |
| Gantt prévisionnel : | 26 |
| Gantt réalisé : | 27 |
| 2.3 - Résultats obtenus | 29 |
| Simulation loi entrée-sortie : | 29 |
| Présentation du système CAO : | 30 |
| Mise en plan : | 30 |
| Présentation du livrable : | 31 |
| Quelques éléments ont été omis à cause d'un manque de temps, mais ils seront ultérieurement installés sur le système. | 31 |
| Retour sur le cahier des charges : | 31 |
| Partie 3 - Limites du projet | 32 |
| 3.1 - Mise en évidence des verrous technologiques identifiés | 32 |
| 3.2 - Rapport d'étonnement | 33 |
| Partie 4 - Retour critique | 33 |
| 4.1 - Choix effectués et leurs conséquences | 33 |
| 4.2 - Modification des choix | 34 |
| 4.3 - Perspectives | 34 |

| | |
|---|-----------|
| Partie 5 - Conclusion | 34 |
| ANNEXES | 35 |
| Annexe 1 : Nomenclature | 35 |
| Annexe 2 : Notice de calcul poussée d'Archimède | 36 |
| Annexe 3 : Notice de calcul motorisation | 37 |
| Annexe 4 : Réalisation arbre roue | 38 |
| Annexe 5 : Choix du montage | 40 |
| Annexe 6 : Choix de la forme de coque | 41 |
| Annexe 7 : Exemple de mise en plan | 42 |
| BIBLIOGRAPHIE | 43 |

Partie 1 - Introduction

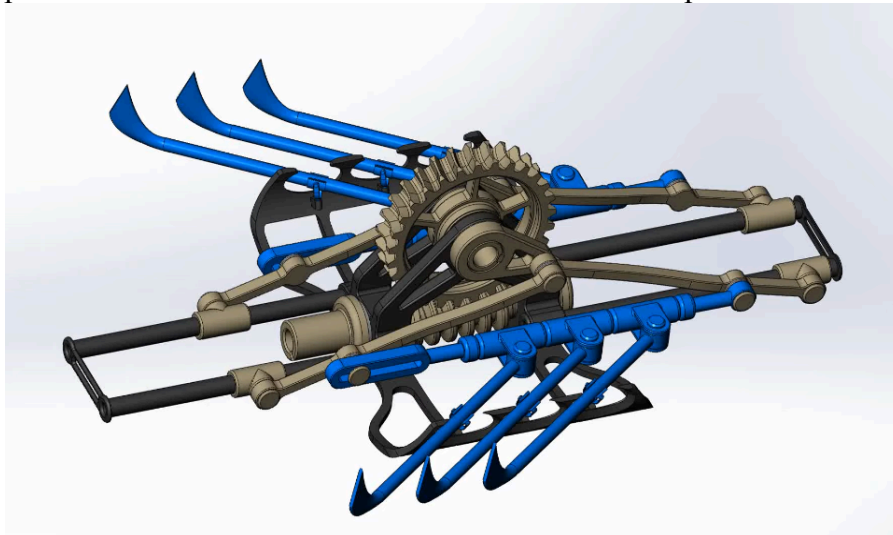
Lors de la deuxième année de BUT Génie Mécanique et Productique, dans le cadre du parcours II : Innovation pour l'industrie, il était demandé de mener un projet de conception et de réalisation d'un prototype fonctionnel. L'objectif était de développer un mécanisme, de septembre à avril, tout en suivant une démarche technique complète, allant de la maquette numérique à la fabrication du système final.

Afin d'orienter le choix du sujet, les référents pédagogiques ont proposé plusieurs mécanismes répondant à plusieurs critères : un système comportant un nombre inférieur de 20 pièces tout en intégrant, au minimum, un système de transmission. Avec cette approche, le choix s'est porté sur un mécanisme de rames synchronisées, devant assurer la coordination et l'efficacité du mouvement des rames.

Le projet a suivi un processus structuré : détermination des paramètres à dimensionner, calculs de dimensionnement incluant la loi entrée-sortie du système, état de l'art, choix définitif du prototype permettant la modélisation numérique, fabrication et commande des composants et assemblage final. Cette démarche a permis de valider la faisabilité technique du prototype tout en respectant une approche industrielle et une méthodologie rigoureuse.

1.1 - Contexte global

Le système choisi est un bateau à rames synchronisées, inspiré d'une vidéo fournie par les professeurs présentant divers mécanismes. Ce choix a été réalisé pour son intérêt mécanique.



[1] : Capture d'écran du système choisi

Pour que le bateau à rames synchronisées respecte les critères imposés, le mécanisme a été simplifié : au lieu des six rames présentes, il n'en reste plus que deux, une de chaque côté. Il serait intéressant de réaliser une étude sur l'utilité et l'influence de ces six rames après la réalisation du prototype. La roue et vis sans fin étant le système de transmission imposé, il est compté comme une pièce à part entière.

Ainsi, le prototype présente 20 pièces sans compter les ajouts tels que le moteur, l'accouplement, la visserie ou encore l'alimentation. Il comporte : un bâti, 4 glissières, 4 bras, 2 manivelles, une roue dentée et vis sans fin, 2 bras dis "oblong" pour leur trou oblong, 2 "liaisons oblong rame" qui se positionnent entre les bras oblong et les rames, 2 rames et 2 rotules. (Cf. [Annexe 1](#))

Le système reproduit le mouvement des rames effectué sur des embarcations comme l'aviron, le kayak ou un bateau à rames. Ici, les rames sont actionnés mécaniquement par l'intermédiaire d'un moteur, ce qui soulève la problématique suivante :

Comment concevoir une maquette permettant d'expérimenter le mouvement synchronisé et elliptique des rames ?

1.2 - Contexte technique

1.2.1 - Identification de la phase de vie du produit

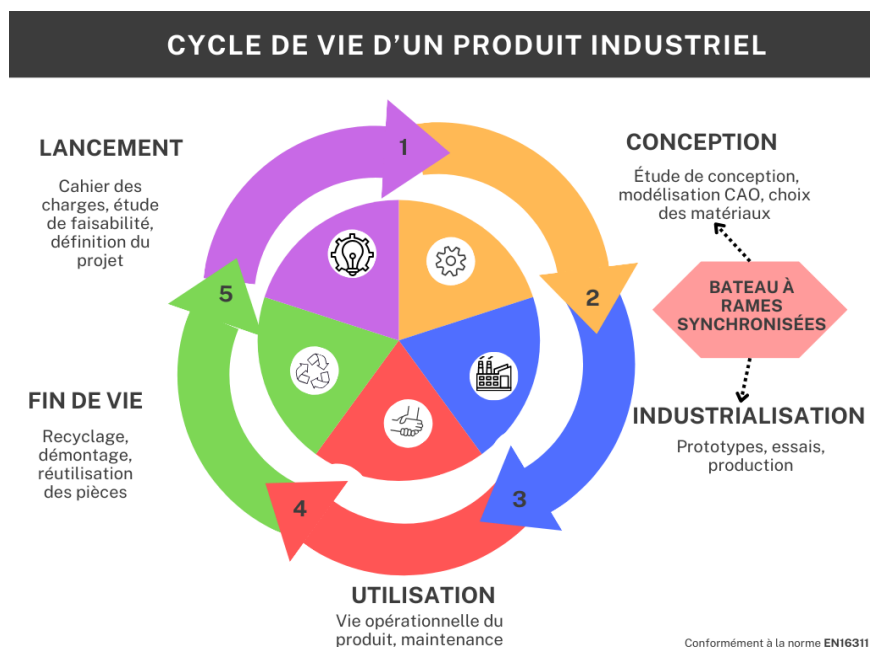


Fig 1 : Diagramme représentant le cycle de vie d'un produit industriel

Bien que l'objectif du projet est de concevoir un prototype, le projet s'inscrit dans la phase de conception pour les études effectuées et la modélisation CAO mais également dans la phase d'industrialisation pour les essais et la réalisation du prototype physique. Ainsi, ce produit industriel est réalisé pour analyser la faisabilité technique et les performances du système avant une éventuelle industrialisation.

1.2.2 - Diagramme des milieux extérieurs

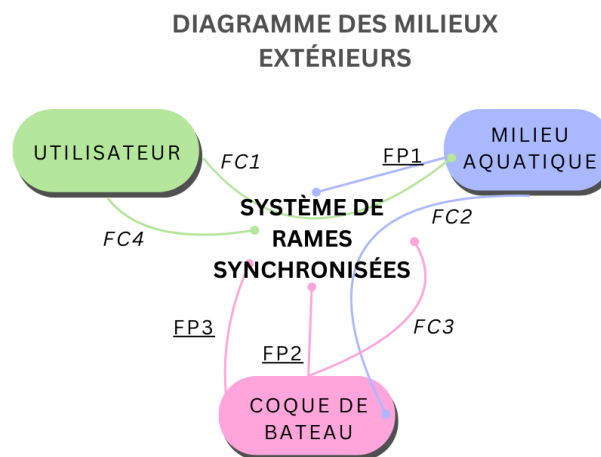


Fig 2 : Diagramme des milieux extérieurs du bateau à rames synchronisées

Le diagramme des milieux extérieurs représente les facteurs externes pouvant influencer le bateau à rames synchronisées. Il permet d'identifier les contraintes et les fonctions principales que devra remplir le prototype. Ces fonctions sont souvent celles présentes dans le cahier des charges. Ici, il y a trois milieux extérieurs :

- Le milieu aquatique : l'environnement dans lequel évolue le bateau impose des contraintes spécifiques, notamment la nécessité de résister à l'eau et à la corrosion, conformément à la fonction contrainte 2.
- La coque de bateau : en tant qu'élément extérieur au prototype, elle doit permettre une fixation stable du bateau tout en assurant la flottabilité du système, conformément à la fonction contrainte 3.
- L'utilisateur : il impose des exigences en termes de sécurité, conformément à la fonction contrainte 1, tout en incluant une facilité d'utilisation.

Ce diagramme permet de mettre en place l'esquisse du cahier des charges et ainsi d'orienter les choix techniques lors de la conception du prototype.

1.2.3 - Cahier des charges

Le cahier des charges permet de définir des exigences et des contraintes précises liées au développement du produit, ici, celui du bateau à rames synchronisées. Il sert de référence tout au long du projet afin d'assurer que les solutions adoptées répondent aux besoins identifiés.

Cahier des charges

Systèmes de rames synchronisées

| Fonction | Critère | Niveau de performance | Contrainte | Contrôle |
|--|--|--|---|--|
| FP1 : Permettre le déplacement sur l'eau | 1.1 : Vitesse de déplacement | < 1 m/s | FC1 : Garantir la sécurité de l'utilisateur et de son environnement | Mesure de la vitesse par test expérimental |
| | 1.2 : Force de propulsion | $F_p > \text{Masse système}$ | | Essai visuel en environnement réel |
| FP2 : Assurer la durabilité du système | 2.1 : Résister aux conditions d'utilisations | Résiste à la corrosion pendant minimum 1 an | FC2 : Assurer l'étanchéité du système pour protéger ses composants Résister aux forces de friction interne et à la corrosion | Test en environnement réel |
| | 2.2 : Choix des composants | Durée de vie d'un an minimum | | Vérification des fiches techniques |
| FP3 : Assurer la stabilité du système de rames | 3.1 : Choix ergonomique de la coque | Bonne répartition du poids du système | FC3 : Fournir une structure stable | Test de flottaison en environnement réel |
| | 3.2 : Encaissement des perturbations et des vibrations | Résiste aux vibrations du système et les légers mouvements dans l'eau (remous) | | Essai dans une bassine |
| FP4 : Permettre la synchronisation des rames | 4.1 : Assurer le mouvement synchronisé | Différence angulaire <5°/m | FC4 : Utiliser une transmission fiable (roue et vis sans fin) | Test visuel sur une distance donnée |
| | 4.2 : Maintenir la cadence des mouvements | 30 coups/min | | Chronométrage des coups donné en 1 min |

Fig 3 : Cahier des charges réalisé sur Sheets

Le cahier des charges du prototype à rames synchronisées présente 4 fonctions principales. Bien que concis, il établit des objectifs simples et réalisables tout en laissant une marge de progression si nécessaire. Les 4 fonctions contraintes associées permettent de guider les choix techniques et ainsi d'assurer la cohérence du projet.

1.3 - Etat de l'art

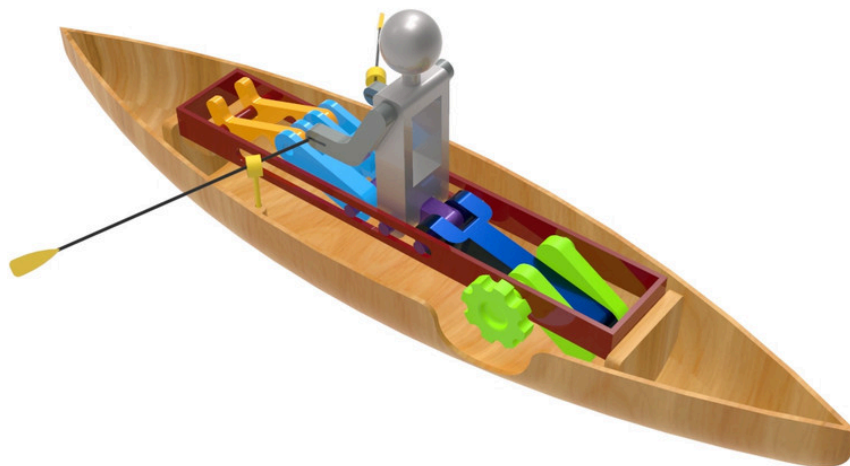
Avant d'entamer la conception du bateau à rames synchronisées, il est essentiel d'analyser les solutions existantes afin d'identifier les mécanismes déjà développés, en considérant à la fois leurs avantages et leurs limites. Cette étude permet soit d'améliorer une solution existante, soit d'en concevoir une nouvelle en s'inspirant des recherches menées dans le domaine.

Lors de la veille informationnelle, il a été nécessaire de découper la recherche en trois parties :

- Les informations commerciales : analyse du marché et des produits existants ainsi que les acteurs du secteur.
- Les informations technologiques : étude des solutions techniques disponibles et des innovations.
- Les informations scientifiques : exploration des principes physiques et des études menées sur le sujet.

Les informations ont été recueillies à partir de moteurs de recherche généralistes pour la partie commerciale (*Google, DuckDuckGo*), de bases de données scientifiques (*Google Scholar, Refseek*) et de plateformes de publications techniques (*Lens.org, Espacenet*).

Solution n°1 : Mécanisme bielle-manivelle

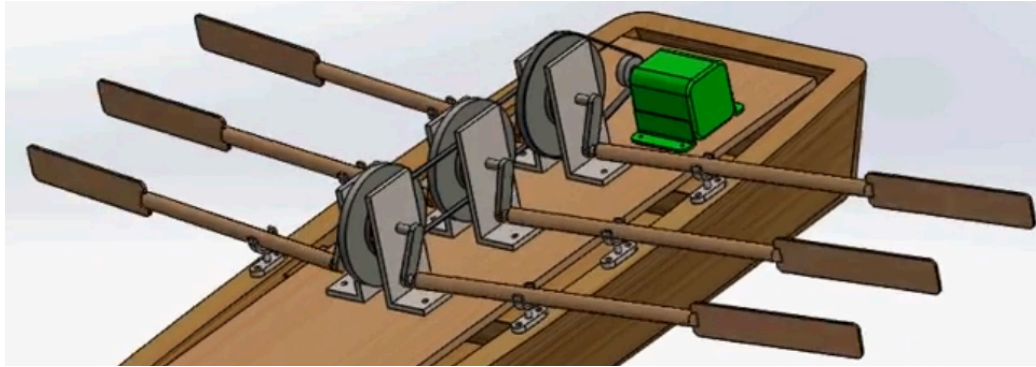


[2] : Image GrabCAD du mécanisme bielle manivelle

Ce système utilise un mécanisme bielle- manivelle pour convertir le mouvement circulaire en deux mouvements rectilignes. Ces deux mouvements, désynchronisés, génèrent un mouvement elliptique qui reproduit l'oscillation d'une rame dans l'eau. Bien qu'il propose

une solution mécanique intéressante, ce modèle reste théorique et nécessite des ajustements pour une réelle application physique.

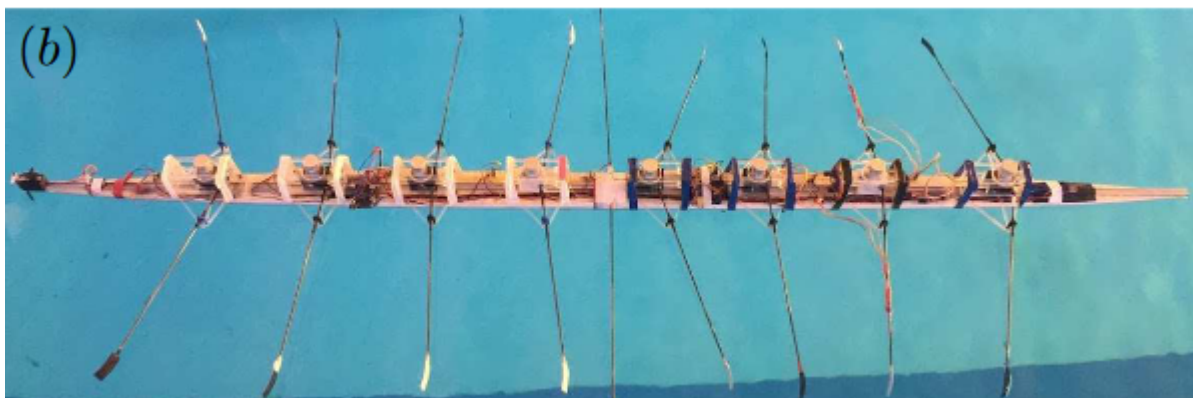
Solution n°2 : Mécanisme poulie-courroie



[3] : Capture d'écran du mécanisme poulie-courroie

Ce mécanisme utilise une poulie courroie pour actionner le mouvement des rames, qui reste circulaire. Ici, c'est la dame de nage qui permet de convertir le mouvement circulaire en un mouvement elliptique pour les rames. Tout comme la solution n°1, ce système reste théorique et demande des ajustements pour une adaptation physique.

Solution n°3 : Modèle expérimental de bateau dynamique



[4] : Image du prototype effectué pour les tests expérimentaux

Ce modèle est une maquette de bateau d'aviron comportant 8 rameurs, qui rament de façon désynchronisée. Il est constitué d'un servomoteur et d'une poulie, une corde est reliée à la poulie permettant la translation d'un chariot par la rotation du servomoteur. Ce système imite

le mouvement des rames grâce à la présence d'une dame de nage, reproduisant ainsi le mouvement de l'aviron dans l'eau. L'objectif de ce modèle expérimental est d'analyser les pertes d'énergie lors de la propulsion du bateau, en particulier lorsque les rameurs sont désynchronisés.

1.4 - Choix de la solution

Schémas de principes

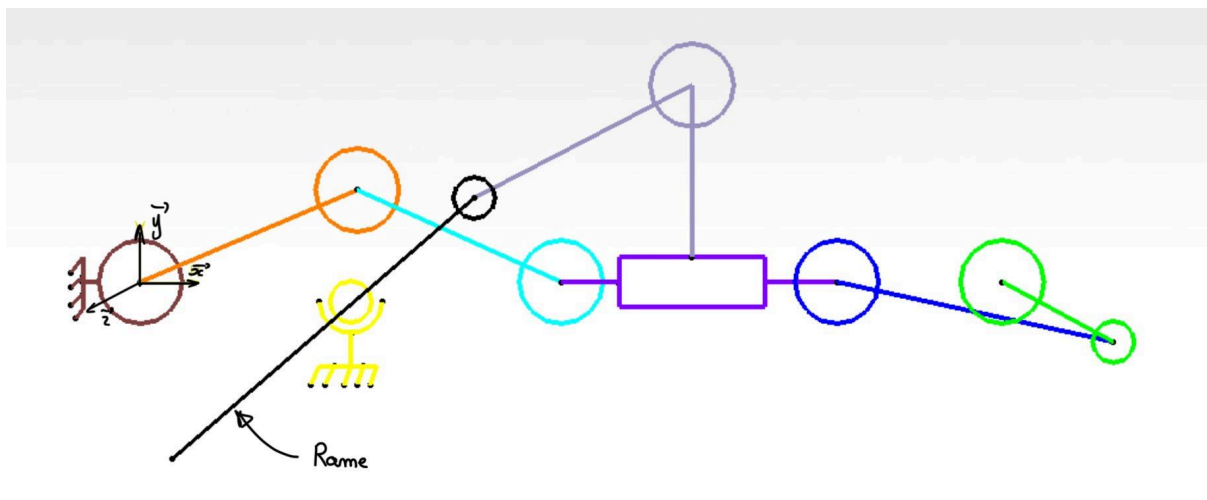


Fig 4 : Schéma cinématique du mécanisme bielle-manivelle

L'entrée du système se fait par la rotation de la **manivelle** (entrée du mécanisme), qui est en liaison pivot avec le **bâti**. Cette manivelle entraîne une **bielle** qui effectue un mouvement circulaire, et ce mouvement est transformé en translation rectiligne grâce à une liaison pivot entre la bielle et la **glissière**. La glissière, qui se déplace le long du bâti, entraîne le **rameur** et les **rames** par l'intermédiaire d'une liaison pivot glissante. Ce mouvement permet aux rames d'effectuer un mouvement elliptique (sortie du mécanisme) grâce à la **dame de nage**, qui est en pivot glissant par rapport au bâti.

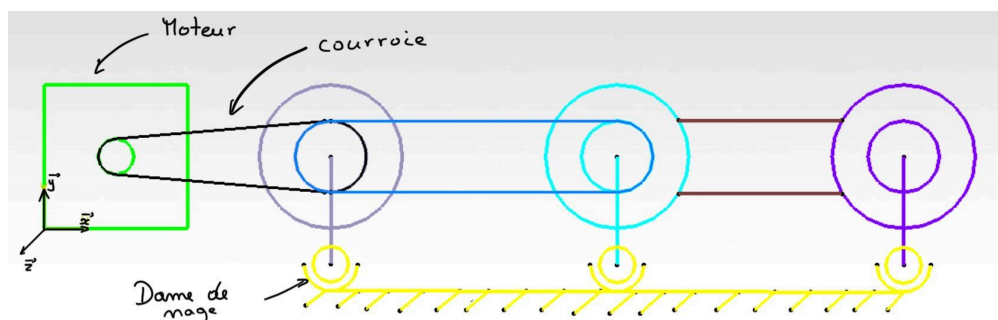


Fig 5 : Schéma cinématique du mécanisme poulie-courroie

L'entrée du mécanisme se fait par la rotation d'un **moteur** qui entraîne une **poulie-courroie**. Cette poulie-courroie entraîne la deuxième roue qui elle entraîne la dernière roue avec une troisième courroie ce qui engendre la rotation de **trois manivelles**, permettant de transmettre le mouvement à trois **rames** simultanément. Les rames, qui sont montées sur des liaisons pivot suivent le mouvement circulaire des manivelles. Elles interagissent avec la **dame de nage**, qui est en liaison pivot glissante et assure le mouvement elliptique des rames. La dame de nage, quant à elle, est fixe et fait partie du **bâti**, ce qui permet de diriger et contrôler le mouvement des rames en sortie du mécanisme.

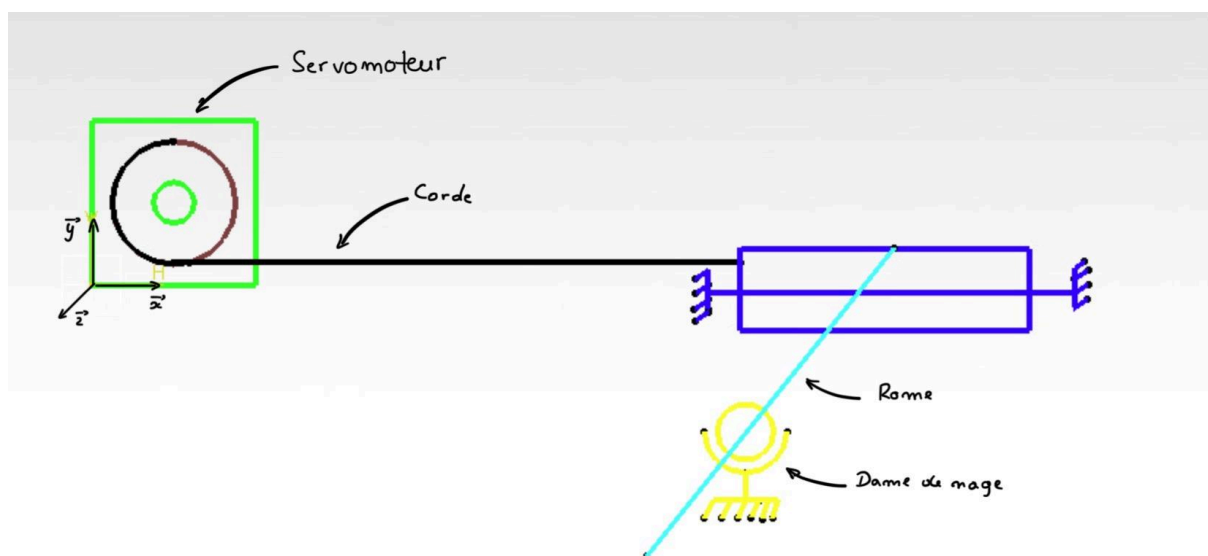


Fig 6 : Schéma cinématique du modèle expérimental

L'entrée du modèle expérimental se fait par un **servomoteur** qui entraîne un **chariot**. Ce chariot, en glissant le long du **bâti**, actionne les **rames** longitudinalement, lesquelles sont reliées par des élastiques. Les rames, qui sont en pivot glissant avec la **dame de nage** se déplacent de gauche à droite et de haut en bas ce qui génère ainsi le mouvement elliptique nécessaire à la propulsion du bateau.

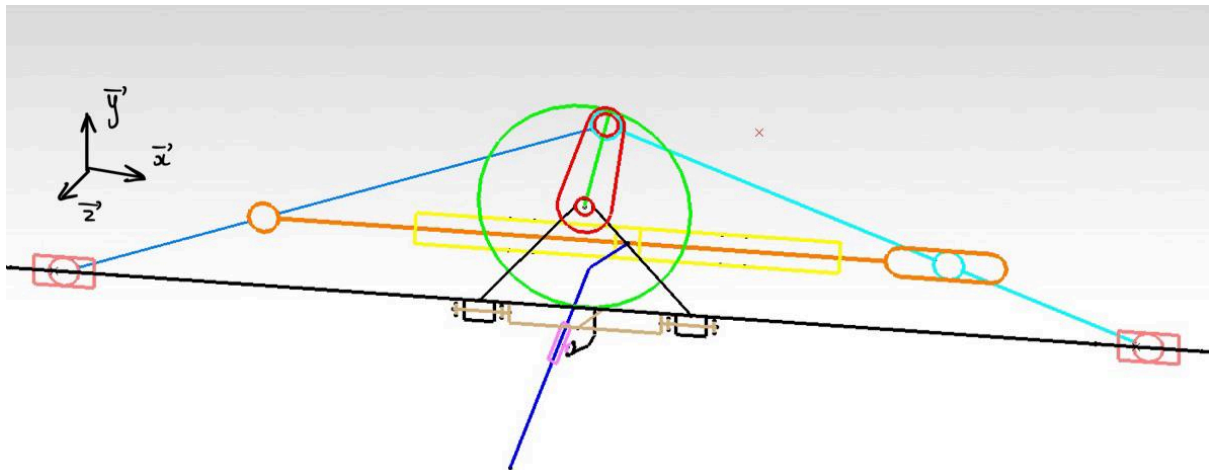

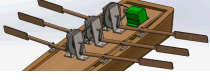
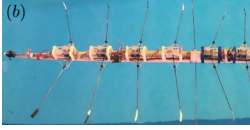
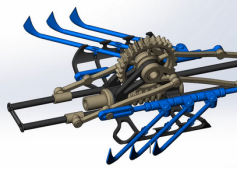


Fig 7 : Schéma cinématique du bateau à rames synchronisées

L'entrée du prototype se fait par la rotation d'un **moteur** qui engendre la rotation de la **vis sans fin** et ainsi de la **roue dentée**. La roue dentée entraîne les **manivelles** par l'intermédiaire d'un **arbre**, qui elles, déplacent les 4 **bras**. Grâce aux 4 **glissières** situées sur le **bâti**, les bras entraînent longitudinalement le **bras oblong**, qui va permettre aux **rames** de se déplacer de gauche à droite. La pièce **liaison oblong rame** permet la rotation des rames par l'intermédiaire d'une **rotule** située sur le bâti. Les rames peuvent donc créer un mouvement d'ellipse tout en étant synchronisées.

Tableau de déclassement

| <i>Solutions/Critères</i> | Synchronisation des rames | Mouvement elliptique des rames | Fiabilité mécanique | Simplicité de fabrication/montage | Réalisation possible en maquette |
|--|--|---|---|---|--|
| <p>Mécanisme bielle-manivelle</p>  | Indéterminé, dépend de la géométrie du rameur (bras parfaitement parallèles) | Très bonne, guidé par une dame de nage flexible | Très bonne, mécanique fiable par sa simplicité et sa bielle manivelle | Moyenne, ajustements précis nécessaires (géométrie du rameur) | Excellente, remplis les besoins soulevés |

| | | | | | |
|---|---|--|---|--|---|
| <p>Mécanisme poulie-courroie</p>  | <p>Difficile, retard dû aux trois courroies et décalages</p> | <p>Très bonne, rotation et translation par les manivelles et les dames de nage</p> | <p>Mauvaise, grand risque de décalage des courroies</p> | <p>Difficile, montage de plusieurs poulies courroies</p> | <p>Difficile, grand encombrement et coûteux</p> |
| <p>Modèle expérimental de bateau dynamique</p>  | <p>Mauvaise, le système est conçu pour des rames désynchronisées</p> | <p>Très bonne, mouvement longitudinal effectué par la glissière et rotation par les dames de nages</p> | <p>Moyenne, contrôle simple via le servomoteur mais les élastiques ne sont pas fiables mécaniquement</p> | <p>Excellente, montage simple et rapide</p> | <p>Moyenne, ne remplit pas les besoins soulevés</p> |
| <p>Mécanisme roue-vis sans fin</p>  | <p>Excellente, les manivelles sont reliées mécaniquement par un arbre centré.</p> | <p>Excellente, mouvement longitudinal effectué par le trou oblong, rotation par la liaison oblong rame et les dames de nages</p> | <p>Excellente, chaque composant est relié et dépend de la roue et vis sans fin, qui est un système de transmission fiable malgré son faible rendement</p> | <p>Difficile, beaucoup de pièces, nécessite un contrôle de jeu pour assurer une synchronisation parfaite en plus d'une conception de coque de bateau</p> | <p>Difficile, nécessite des ajustements</p> |

Partie 2 - Développement solution technique

2.1 - Méthodes utilisées

Dans cette partie, l'ensemble des étapes méthodologiques sont présentés de manière chronologique. L'objectif est de détailler le cheminement et la réflexion mise en œuvre tout au long du projet. Une notice de calcul est également incluse pour justifier les choix techniques effectués au cours de la conception.

Il est important de noter que dans un contexte de prototypage, le but recherché est de valider le fonctionnement du mécanisme. Ainsi, la question d'industrialisation de certaines pièces révèle d'un autre projet à part entière et n'a donc pas été abordée dans le cadre de cette étude.

2.1.1 - Analyse cinématique

Pour commencer l'analyse cinématique du mécanisme, il a été important d'analyser longuement la vidéo afin d'observer toutes les subtilités de celle-ci. La première étape a été de réaliser un graphe de liaison afin de réaliser un schéma cinématique et de connaître le degré d'hyperstatisme du système. Pour la suite, l'étude cinématique se fera sur un côté, le système étant symétrique et le problème est plan.

Graphe de liaisons

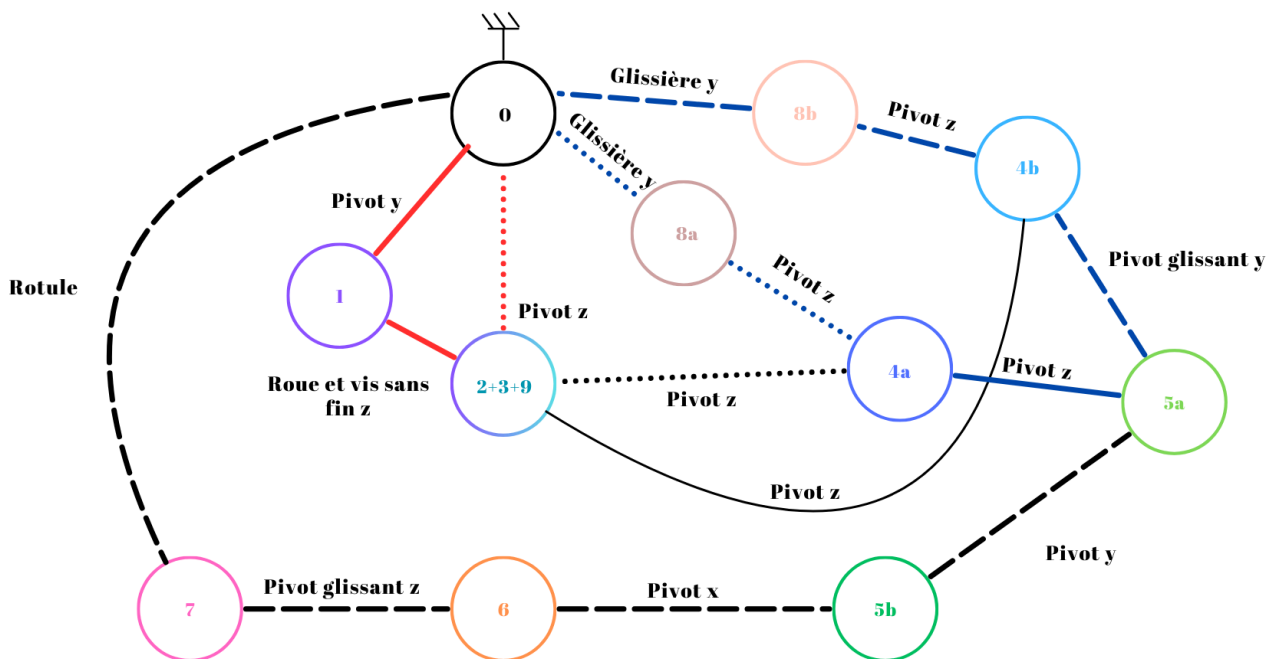


Fig 8 : Graphe de liaisons du bateau à rames synchronisées.

Le graphe de liaisons comporte plusieurs boucles, signe qu'il y a plusieurs lois entrées et sorties. Ainsi le calcul des lois se fera boucle par boucle afin de réduire le plus possible les inconnues et ainsi de connaître les paramètres de sorties.

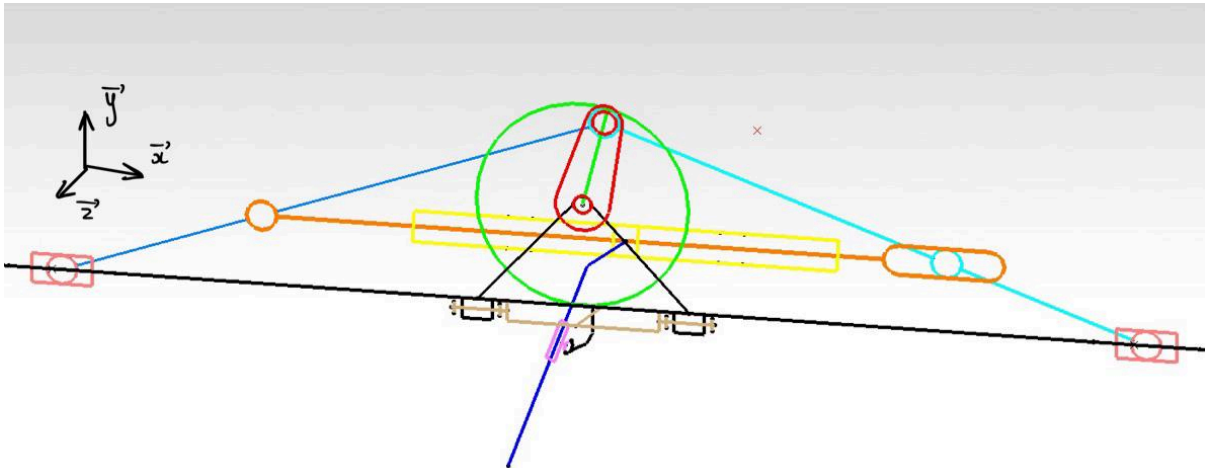


Fig 7 : Schéma cinématique résultant du graphe de liaisons

Ce schéma cinématique a servi aux calculs des lois entrées sorties. Une fois le squelette pilotant réalisé, tous les paramètres ont été déterminés pour chaque pièce afin d'obtenir une conception fonctionnelle en termes de dimensions.

Calcul du degré d'hyperstatisme à partir de la formule de Grübler-Kutzbach [5]:

$DDL = 3(n - 1) - J1 - 2J2 - 3J3$ avec J_i le nombre de liaisons qui enlèvent i degré de libertés et n le nombre d'éléments mobiles (Ici $n=10$)

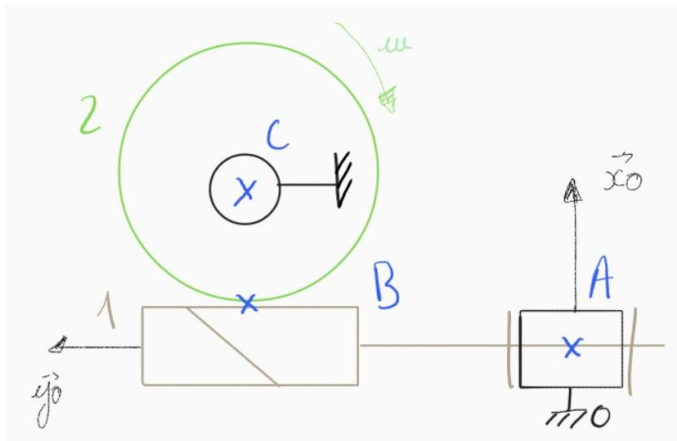
Il y a 10 liaisons pivots (Cf. Graphe des liaisons) et sur 3 DDL (degré de libertés) la liaison supprime 2 DDL car elle permet la rotation autour d'un axe tout en empêchant le mouvement de translation dans les deux autres directions. Ainsi $J2 = 10$.

Il y a 2 pivots glissants et 2 glissières qui suppriment 1 DDL donc $J1 = 4$. De même, $J3 = 1$ car il y a une rotule, supprimant 3 DDL.

Avec ces données : $DDL = 3(10 - 1) - 4 - 2 \times 10 - 3 \times 1 = 0$

→ Le système est isostatique, chaque mouvement peut être défini. Il y a donc 1 loi entrée sortie principale, constituée de plusieurs petites lois entrées- sorties.

Le calcul des lois entrées sorties est définie par les boucles du graphe de liaisons, la plus simple étant celle entre la roue et la vis sans fin (boucle rouge), qui correspond à un simple calcul de rapport.



Le rapport d'une roue et vis sans fin est définie par :

$$\frac{\omega_{20}}{\omega_{10}} = \frac{z_1}{z_2}$$

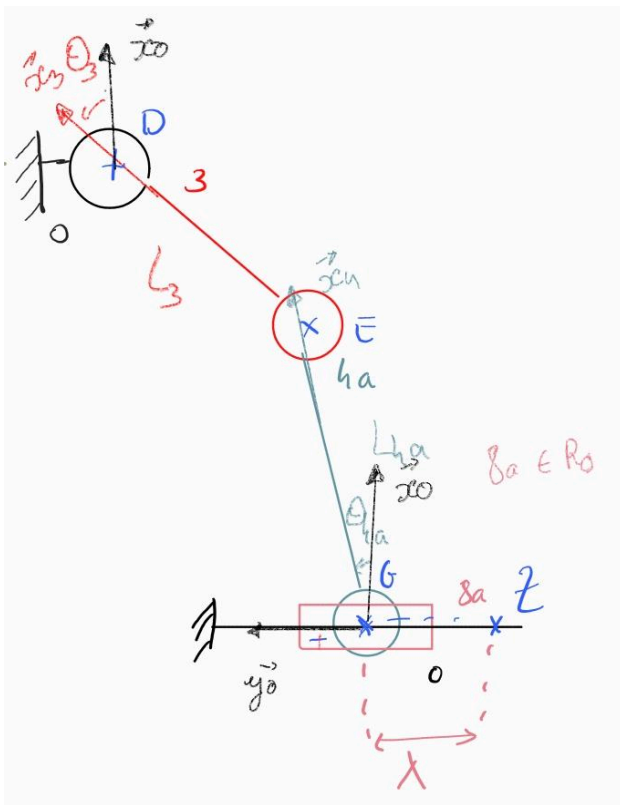
Avec **2 la roue dentée** et **1 la vis sans fin**, **0** représente le **bâti**.

Ici Z_1 représente le nombre de filet de la vis sans fin.

Fig 9 : Schéma paramétré roue 2 et vis sans fin 1

Condition d'engrènement : les deux composants doivent avoir le même module m [8]

La deuxième loi entrée-sortie est celle d'une bielle manivelle (boucle en pointillé). Le calcul sera fait deux fois, pour chaque bras $4a$ et $4b$.



3 représente **la manivelle** avec son angle de rotation θ_3 . Par mesure de simplicité, par la suite l'entrée du mécanisme global est $\theta_3 = \frac{z_1}{z_2}$.

4a est **le bras** avec l'angle θ_{4a} . λ est la **course de la glissière**, ici la sortie du mécanisme. Il faut donc exprimer λ selon θ_3 .

Fig 10 : Schéma paramétré bras 4a et manivelle 3

Fermeture géométrique :

$$\overrightarrow{DE} + \overrightarrow{EG} + \overrightarrow{GZ} = \vec{0}$$

$$-l_3 \overrightarrow{x_3} - l_{4a} \overrightarrow{y_{4a}} + \lambda_1 \overrightarrow{y_0} = \vec{0}$$

$$-l_3 (\cos \theta_3 \overrightarrow{x_0} - \sin \theta_3 \overrightarrow{y_0}) - l_{4a} (\cos \theta_{4a} \overrightarrow{y_0} - \sin \theta_{4a} \overrightarrow{x_0}) + \lambda_1 \overrightarrow{y_0} = \vec{0}$$

$$\overrightarrow{x_0} (-l_3 \cos \theta_3 + L_{4a} \sin \theta_{4a}) + \overrightarrow{y_0} (l_3 \sin \theta_3 - L_{4a} \cos \theta_{4a} + \lambda_1) = \vec{0}$$

$$\begin{aligned} -L_3 \cos \theta_3 + L_{4a} \sin \theta_{4a} = 0 \\ L_3 \sin \theta_3 - l_{4a} \cos \theta_{4a} + \lambda_1 = 0 \end{aligned} \Rightarrow \begin{aligned} \sin \theta_{4a} &= \frac{l_3 \cos \theta_3}{L_{4a}} (1) \\ \cos \theta_{4a} &= \frac{l_3 \sin \theta_3}{L_{4a}} + \lambda_1 (2) \end{aligned}$$

$$(1)^2 + (2)^2 = \sin^2 \theta_{4a} + \cos^2 \theta_{4a} = \left(\frac{l_3 \cos \theta_3}{L_{4a}} \right)^2 + \left(\frac{l_3 \sin \theta_3 + \lambda_1}{L_{4a}} \right)^2 = 1$$

$$(l_3 \sin \theta_3 + \lambda_1)^2 = l_{4a}^2 - (l_3 \cos \theta_3)^2$$

$$\sqrt{(l_3 \sin \theta_3 + \lambda)^2} = \sqrt{l_{4a}^2 - (l_3 \cos \theta_3)^2}$$

$$\lambda_1 = \sqrt{l_{4a}^2 - (l_3 \cos \theta_3)^2} - l_3 \sin \theta_3$$

Le résultat énonce une condition de fonctionnement : il faut que la longueur du bras (l_{4a}) soit plus grande que la longueur de l'entraxe de la manivelle (l_3). Soit $L_{4a} \gg L_3$, en général $L_{4a} > 5L_3$ est suffisant.

Pour le bras 4b, la démarche est la même : $\lambda_2 = L_3 \sin \theta_3 - \sqrt{l_{4b}^2 - (L_3 \cos \theta_3)^2}$

La même condition de fonctionnement s'applique pour le bras 4b. Ici, λ_2 est négatif car la course va dans le sens inverse que celle de λ_1 . Si $L4a = L4b$, par déduction $\lambda_1 = -\lambda_2$

La partie difficile de cette analyse cinématique est la dernière boucle (représentée en tirets), car il y a trois paramètres de sorties, qui sont : P_6 , la course de la rame en longueur (selon z), φ_6 la course de la rame en hauteur (selon y) et l'angle θ_{65b} qui est la rotation de la rame (selon y). Les 3 sorties dépendent l'un de l'autre, il suffit de trouver l'équation reliant un de ces paramètres avec l'entrée ainsi que la relation qui lie les trois paramètres afin d'obtenir la loi entrée sortie finale.

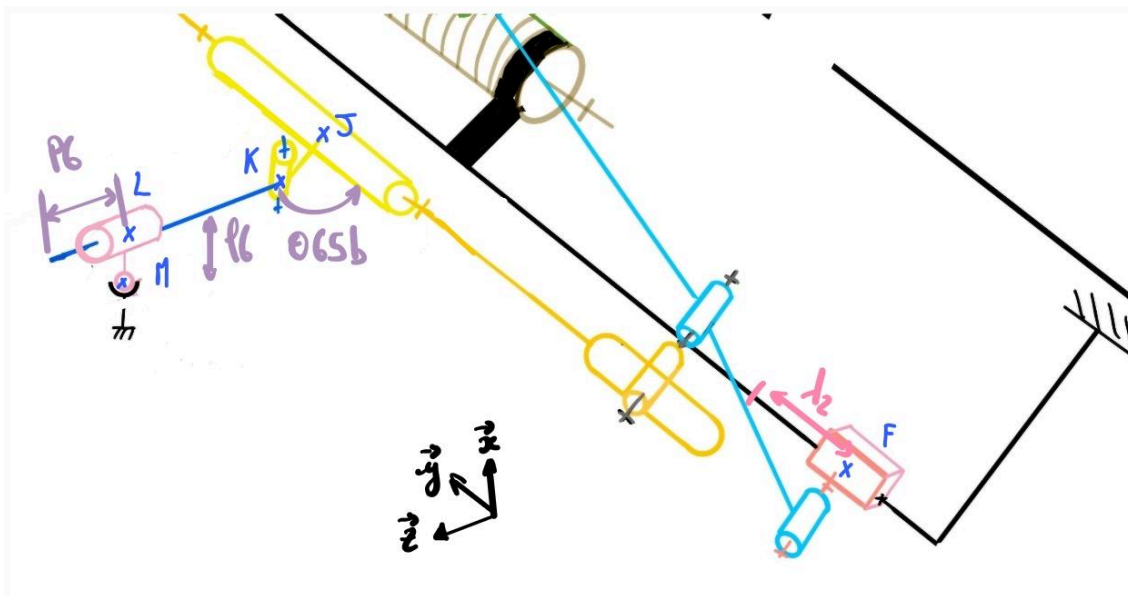
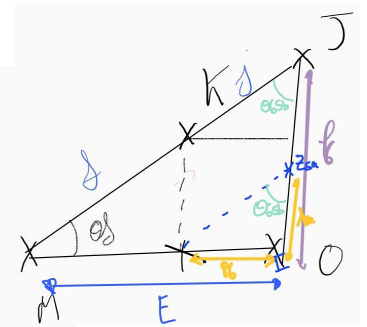


Fig 11 : Extrait du schéma cinématique représentant en violet les 3 paramètres sorties

Pour déterminer φ_6 , la course de la rame en hauteur, un triangle rectangle est réalisé afin de faire une fermeture géométrique.



$$\vec{MO} + \vec{OJ} + \vec{Jk} + \vec{kM} = \vec{0}$$

$$E\vec{z} + \varphi_6\vec{x} - j \cos \theta_{5a5b}5b\vec{x} + j \sin \theta_{5a5b}5b\vec{z} + k \cos \theta_k\vec{z} - k \sin \theta_k\vec{x} = \vec{0}$$

$$\Rightarrow E = K \cos \theta K + j \sin \theta_{5a5b} \quad (1)$$

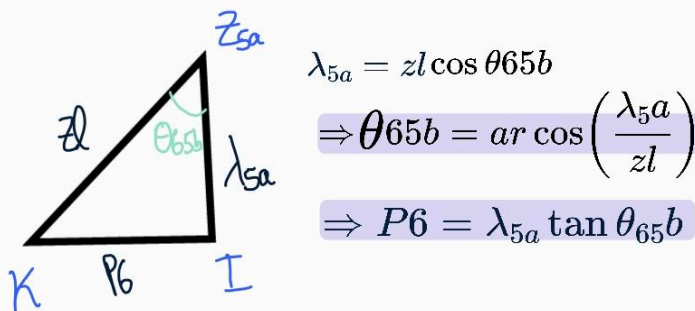
$$\varphi_6 = k \sin \theta k + j \cos \theta_{5a5b} \quad (2)$$

$$(1)^2 + (2)^2 = E^2 + j^2 \sin^2 \theta_{5a5b} - 2Ej \sin \theta_{5a5b} + \varphi_6^2 + j^2 \cos^2 \theta_{5a5b} - 2\varphi_6 j \cos \theta_{5a5b} = k^2$$

$$\Delta > 0 \Rightarrow \theta_{5a5b}$$

$$\varphi_6 = j \cos \theta_{5a5b} + \sqrt{k^2 - E^2 - j^2 + 2Ej \sin \theta_{5a5b}}$$

Les deux autres équations s'obtiennent facilement.



Ainsi, les trois sorties dépendent de la course du bras oblong λ_{5a} et l'angle de rotation θ_{5a5b} entre le bras 5a et 5b. La suite des calculs consiste à déterminer ces deux paramètres afin d'avoir une loi entrée sortie complète du mécanisme

Détermination de λ_{5a} :

Par fermeture géométrique :

$$\vec{HE} + \vec{EI} + \vec{IH} = \vec{0}$$

$$-h_{4a} \vec{y}_{4a} - i_{4b} \vec{y}_{4b} + (L_{5a} - e_{5a} + \lambda_{5a}) \vec{y}_0$$

$$\Rightarrow -h_{4a} \sin \theta_{4a} - i_{4b} \sin \theta_{4b} = 0$$

$$\Rightarrow -h_{4a} \cos \theta_{4a} - i_{4b} \cos \theta_{4b} + L_{5a} - e_{5a} + \lambda_{5a} = 0$$

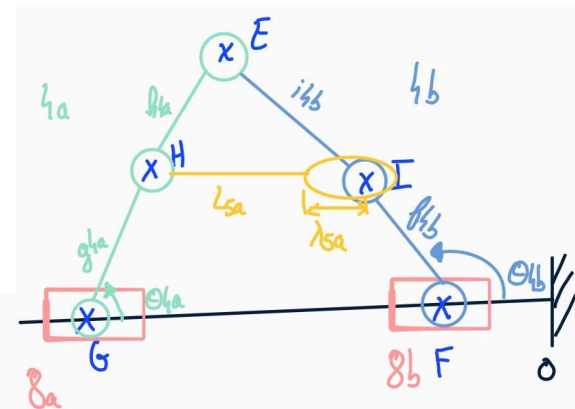
$$\sin \theta_{4b} = \frac{-h_{4a} \sin \theta_{4a}}{i_{4b}} \quad (1)$$

$$\Rightarrow \cos \theta_{4b} = \frac{-h_{4a} \cos \theta_{4a} + L_{5a} - e_{5a} + \lambda_{5a}}{i_{4b}} \quad (2)$$

$$(1)^2 + (2)^2 = \left(\frac{-h_{4a} \sin \theta_{4a}}{i_{4b}}\right)^2 + \left(\frac{-h_{4a} \cos \theta_{4a} + L_{5a} - e_{5a} + \lambda_{5a}}{i_{4b}}\right)^2 = 1$$

$$\lambda_{5a} = \sqrt{i_{4b}^2 - (h_{4a} \sin \theta_{4a})^2} + h_{4a} \cos \theta_{4a} - L_{5a} e_{5a}$$

$$\theta_{4a} = \arcsin\left(\frac{L_3 \cos \theta_3}{L_{4a}}\right) \text{ obtenu par la loi entrée sortie bielle manivelle.}$$



Ainsi λ_{5a} est exprimé selon l'entrée θ_3 . Il reste à déterminer θ_{5a5b} selon θ_3 afin d'obtenir la loi entrée sortie du système.

Malgré toute les tentatives l'angle θ_{5a5b} n'a pas pu être exprimé selon θ_3 , empêchant ainsi d'obtenir la loi entrée-sortie finale du mécanisme. Une simulation grâce au squelette pilotant a été réalisée afin de comparer les données en prenant les dimensions mises sur le squelette. (Cf. [2-3 Résultats obtenus](#))

2.2.2 - Conception CAO

Bâti :

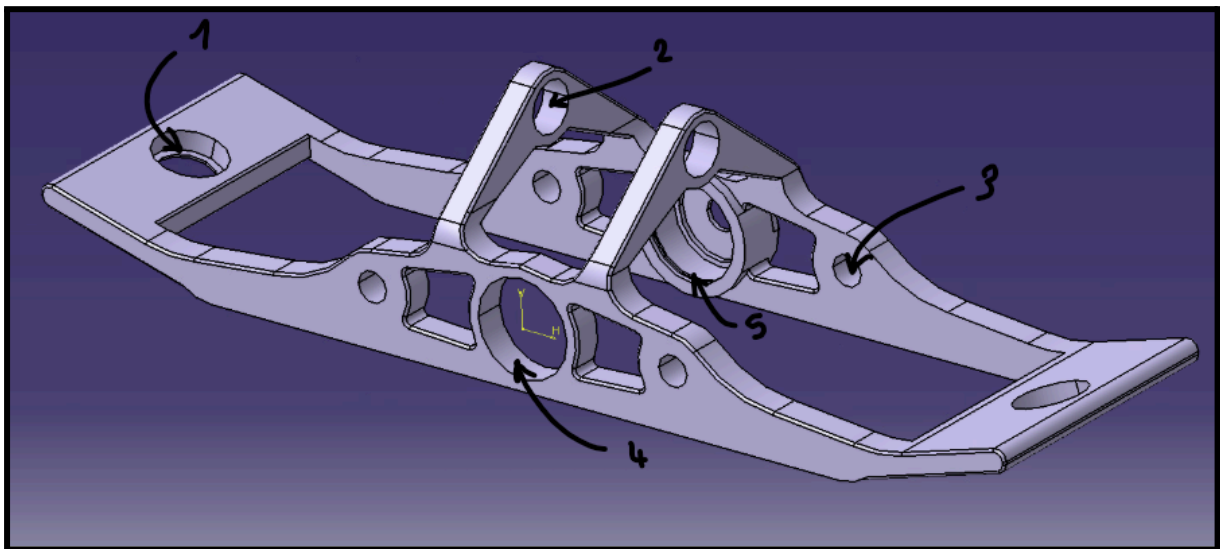


Fig 12 : Image de la CAO du Bâti

Le bâti nous fournit la base nécessaire pour installer l'ensemble de notre système, y compris les arbres et les tubes qui garantissent son fonctionnement optimal. C'est pour cette raison qu'il est essentiel de fabriquer nos pièces correctement en respectant les ajustements requis. Le premier trou (1) autorise le placement d'une rotule en butée avec la surface de fond, tandis que le second trou (2) permet de positionner l'axe de la roue avec un palier lisse ajusté serré sur celui-ci et glissant sur le support, ce qui permet une rotation par rapport au support tout en conservant un coefficient de friction élevé. Les emplacements (4) et (5) nous offrent la possibilité d'installer l'arbre vis sans fin en montage arbre long BI serrées sur l'arbre, ce qui permet de conserver une rotation par rapport à l'arbre, un aspect crucial pour travailler avec la roue dentée. Les orifices (3) facilitent l'alignement du tube de la structure qui permet le

déplacement des glissières. Les orifices sont soigneusement alignés pour prévenir les problèmes de parallélisme dans le système, ce qui pourrait nuire à ses performances.

Pour réaliser la pièce de manière appropriée, il était nécessaire d'établir les dimensions principales à partir des éléments dont nous disposions. Pour choisir notre matériau, nous avons rapidement examiné les forces inférieures à 10Nm, ce qui nous a amenés à décider qu'une impression 3D (PLA) serait plus avantageuse pour simplifier sa production et économiser du temps étant donné la complexité géométrique de la pièce.

Rames :

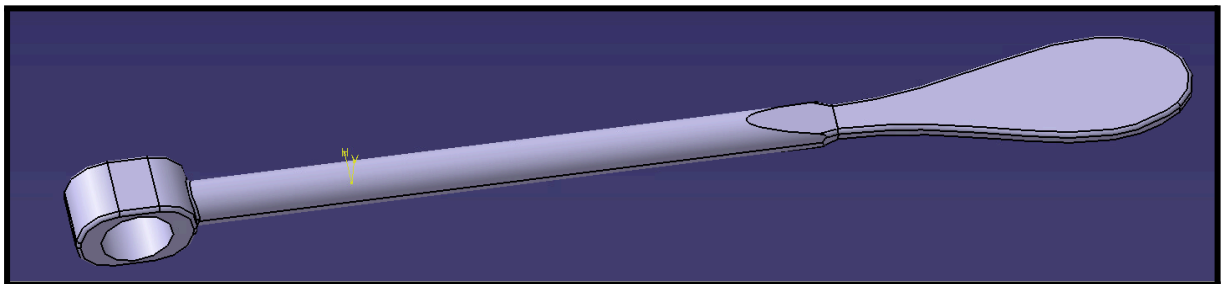


Fig 13 : Image CAO d'une rame

Les rames, connectées à la pièce de liaison, sont dotées de trous placés dans les paliers lisses qui favorisent un meilleur coefficient de frottement. Leur mouvement elliptique est engendré par la rotation de la pièce de liaison rame sur le bras oblong ainsi que par le positionnement de la rame dans la rotule. Grâce à leur mouvement elliptique, les rames facilitent le déplacement dans l'eau.

Pour réaliser correctement la pièce, il a été nécessaire d'établir les dimensions principales à partir des composants disponibles : palier lisses et rotules. Pour choisir notre matériau, nous avons rapidement calculé les contraintes en milieu aquatique, ce qui nous a amenés à conclure que l'impression 3D (PLA) serait appropriée pour simplifier sa fabrication et économiser du temps compte tenu de la complexité géométrique de l'élément.

Partie arbre vis sans fin :

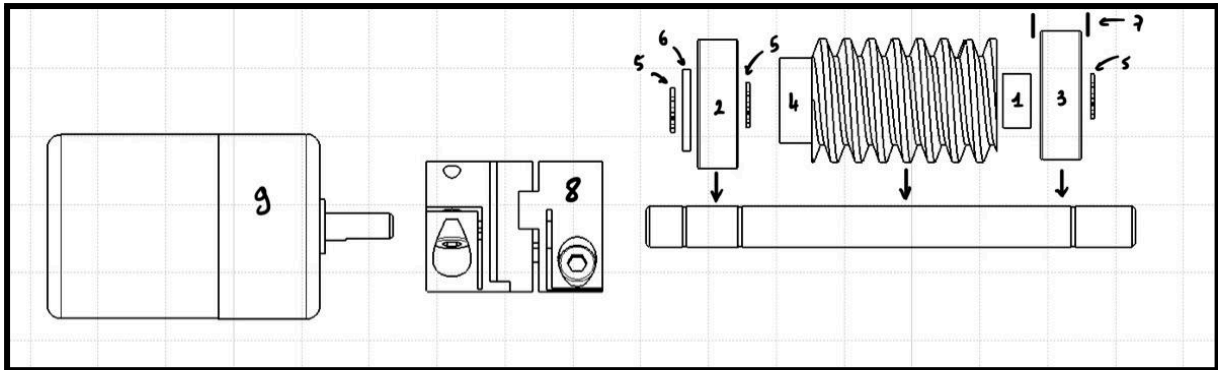


Fig 14 : Schéma de l'assemblage de la partie arbre vis sans fin

L'assemblage de l'arbre à vis sans fin favorise une rotation efficace grâce aux roulements à billes à contact radial (2) et (3), montés BI serrés sur un arbre long (cf. [annexe 6](#)). Les éléments (1), (5) et (6) assurent la bonne exécution de notre assemblage par le biais des gorges destinées au placement des circlips (5) et rondelles (6), ce qui permet d'effectuer nos blocages en translation. L'accouplement (9) et (8) permettent la rotation de notre dispositif en resserrant l'accouplement sur l'arbre ainsi que sur la tige du moteur (9). Le moteur (9) est relié à une batterie et un commutateur, permettant ainsi son contrôle par l'utilisation de ce dernier.

Les dimensions et les composants ont été sélectionnés en tenant compte de celles de notre vis sans fin. Il a été recommandé d'opter pour l'acier pour la vis sans fin afin d'assurer un bon coefficient de frottement avec la roue dentée imprimée en résine SLA.

Partie roue manivelle :

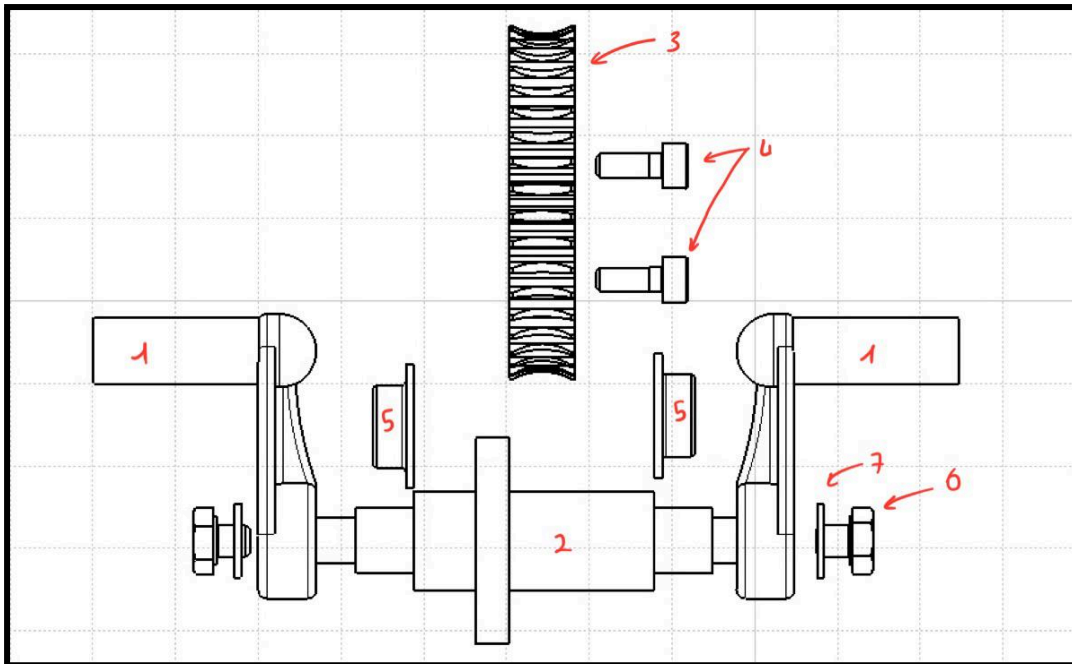


Fig 15.: Schéma de la CAO de la partie roue manivelle

Le mécanisme de la manivelle, qui s'engrène avec la roue dentée (3) sur la vis sans fin de l'arbre à vis sans fin, permet le mouvement des manivelles (1). Ce dernier est assuré par le montage serré H7m6 sur l'arbre ainsi que par le serrage des trois vis CHC M3x6 (4), espacées les unes des autres d'environ 120°. Les manivelles sont mises en place grâce à un carré voir réalisation (cf. [annexe 5](#)) qui facilite leur positionnement symétrique, ce qui est crucial pour synchroniser les rames. Les rondelles (7) et les vis (6) servent à les fixer contre l'épaule pour prévenir tout mouvement de translation. Les paliers lisses ajustés H7m6 autorisent un mouvement rotatif par rapport au cadre, ce qui facilite la rotation de notre composant roue manivelle.

La sélection des composants s'est faite en fonction du diamètre de la roue dentée et des paliers lisses. La décision de fabriquer la roue dentée en SLA était principalement due à son absence sur les sites des fabricants, ce qui a nécessité une adaptation. De plus, nous avons opté pour un matériau en résine en considérant le coefficient de friction avec la vis sans fin en acier (environ 0.2 à 0.3). [7]

Partie manivelle - bras :

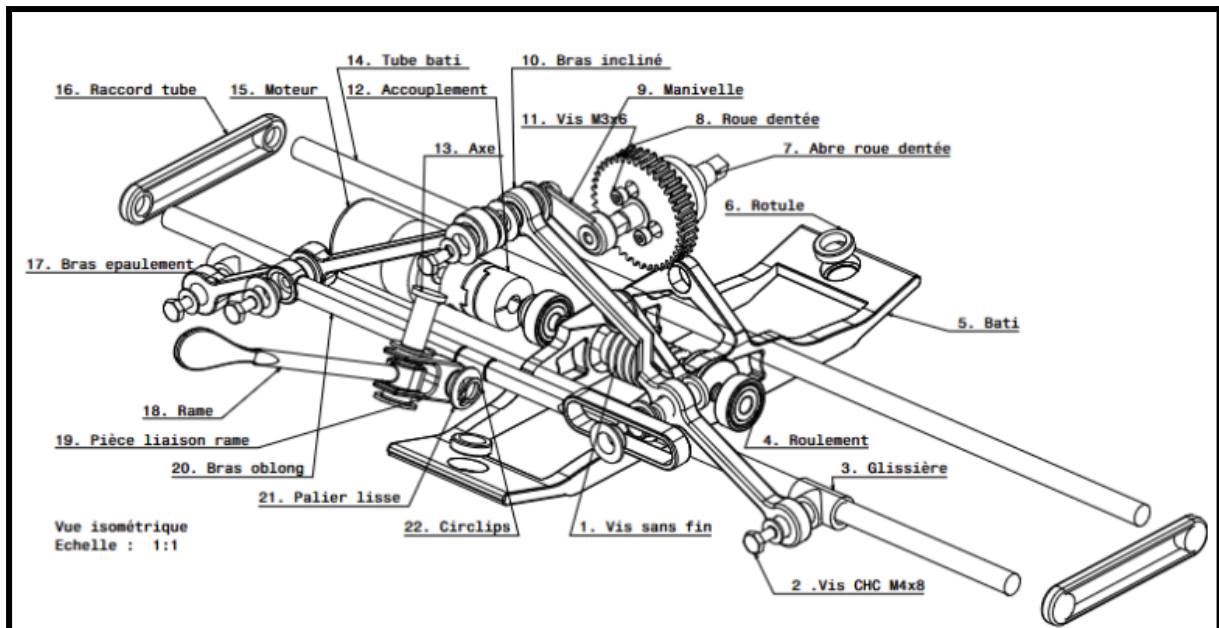


Fig 16 : CAO système complet pour représenter les bras

Les bras (17) et (10) assurent la transmission du mouvement rotatif des manivelles (9) vers les tubes de structure (14) via les glissières (3), facilitant ainsi le mouvement elliptique des rames (18). Ceci est rendu possible grâce à la rotation du bras allongé (20) et au pivotement de la liaison rame (19), qui maintient la rame en place sur les rotules (6) fixées au bâti.

La sélection des dimensions a été effectuée en fonction de l'élaboration du schéma cinématique précédemment conçu et des dimensions de la vis sans fin et de la roue dentée. On a opté pour la fabrication des bras en PLA pour économiser du temps, étant donné que leur réalisation par usinage ou avec des géométries complexes aurait été difficile et prolongée. L'idée du SLA a été proposée, mais elle a vite été rejetée puisque la découpe aurait rendu impossible la création de formes en volumes.

Flotteur :

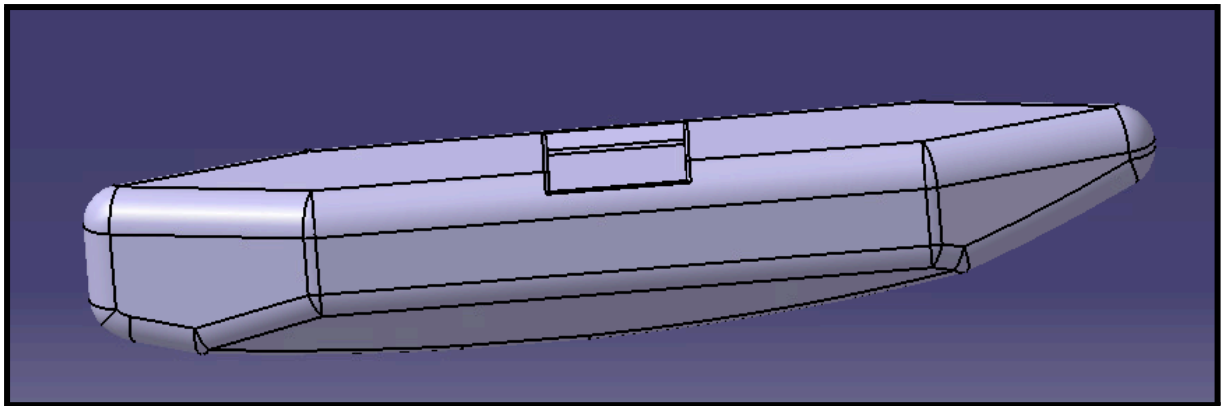


Fig 17 : Image CAO d'un flotteur

Les flotteurs nous offrent la possibilité de rendre notre système flottant. Nous avons décidé d'opter pour deux flotteurs placés des deux côtés de notre dispositif, à la manière d'un catamaran (cf. [annexe 7](#)).

Les dimensions ont été obtenues grâce au calcul de la poussée d'Archimède (cf. [annexe 3](#)).

Initialement, les flotteurs ont été fabriqués en 3D avec un remplissage de 20%, puis on a appliqué de la fibre de verre dessus pour améliorer leur flottabilité et prévenir le gonflement du PLA au contact de l'eau.

Trois couches de fibre de verre ont été appliquées avec de la colle, puis séchées dans un four. Ensuite, les parties excédentaires ont été découpées à l'aide d'une dremel.

Collage de la fibre de verre :



Fig 18 : Photo collage fibre de verre

3 couches en appliquant de la colle (catalyseur + colle Epoxy) sur toutes les surfaces entre chaque couche.

Séchage de la colle à l'aide du four :



Fig 19 : Photo séchage du flotteur

Avec une durée de chauffage de 10 min à 600°C afin de sécher plus rapidement la colle.

Découpage des morceaux de fibre de verre en trop :



Fig 20 : Photo sortie de four



Fig 21 : Rendu final du flotteur

2.2 - Gestion de projet

Afin de mener à bien le projet, une gestion par étapes a été mise en place afin de réaliser le prototype dans le temps imparti. La planification des tâches à travers un diagramme de Gantt, l'organisation générale ainsi que la répartition du travail ont été établies afin d'optimiser l'efficacité du binôme. Un suivi hebdomadaire et la mise en place de nouveaux objectifs ont permis d'ajuster le planning en fonction de l'avancement réel et permettant ainsi de rentrer dans les délais.

Gantt prévisionnel :

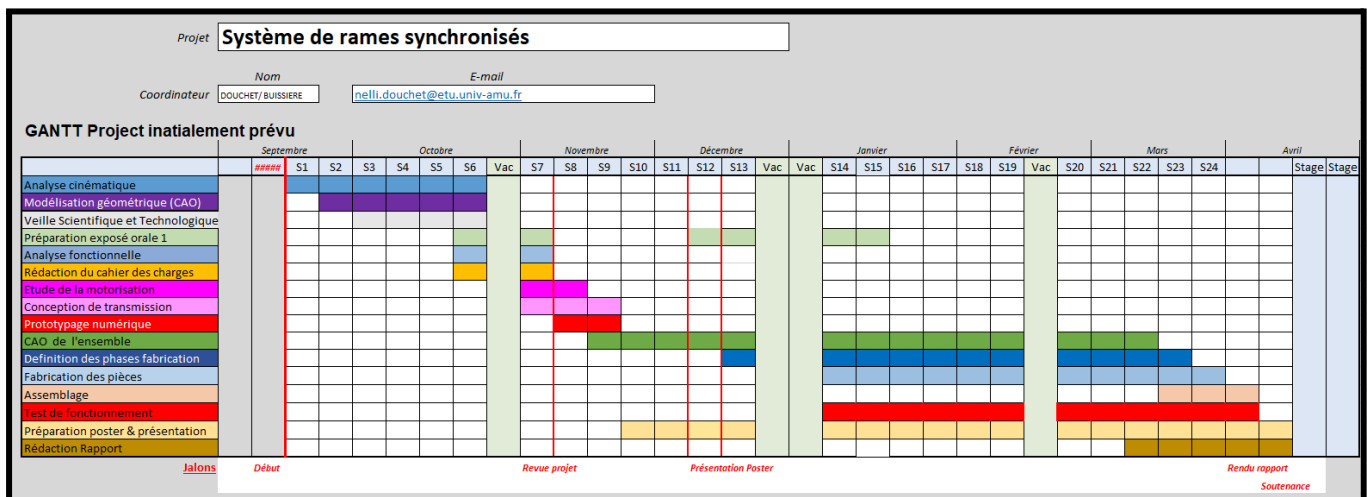


Fig 23 : Capture d'écran du Gantt réalisé le 27/10/2024

Gantt réalisé :

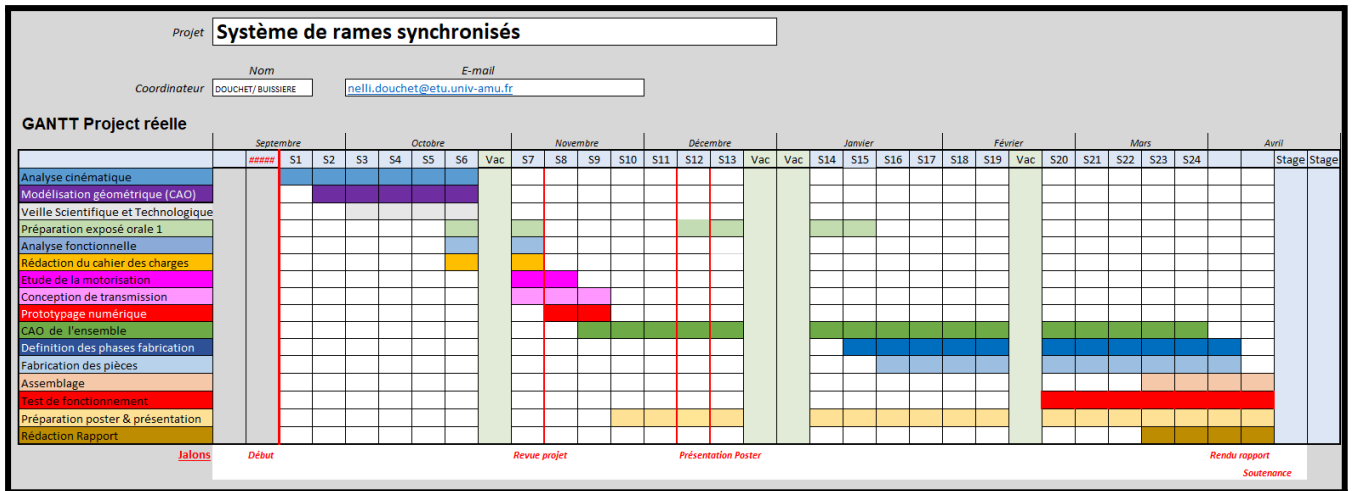


Fig 24 : Capture d'écran du Gantt réalisé le 26/03/2025

Comme l'illustrent les deux diagrammes de Gantt (prévisionnel et réalisé), un décalage est apparu, principalement dû à des difficultés rencontrées lors de la phase de conception en CAO. Cette tâche, particulièrement longue et exigeante, a demandé une attention particulière car elle représente le cœur du projet et se rapproche le plus de la solution finale. Ce contretemps a impacté la suite du projet, en retardant les étapes suivantes et en supprimant la marge initialement prévue pour faire face à d'éventuelles erreurs ou imprévus.

Le projet a été découpé en plusieurs grandes phases :

- Analyse cinématique (6 semaines) : Définition de la loi entrée-sortie du système et réalisation du squelette pilotant en CAO
- Veille scientifique et technologique (4 semaines) : Recherche des solutions existantes
- Analyse fonctionnelle (2 semaines) : Analyse des milieux extérieurs et rédaction du cahier des charges
- Choix de la solution technique (15 semaines) : Etude de la motorisation, conception de la transmission et modélisation 3D du prototype.
- Réalisation et fabrication des pièces (10 semaines) : Impression et usinage des pièces, réalisation d'un devis.
- Tests (4 semaines) : Assemblage du prototype, tests de fonctionnement et ajustements.
- Rédaction du rapport (4 semaines) : Mise au propre des tâches effectuées, compte-rendu et préparation à la soutenance orale

Le travail a été partagé entre les deux membres du binôme selon les compétences et préférences de chacun :

| Tâche | Nelli DOUCHET | Nathan BUISSIÈRE |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Calcul loi entrée sortie | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Réalisation squelette pilotant | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Veille scientifique | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Analyse des milieux extérieurs | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Rédaction du cahier des charges | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Etude de la motorisation | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Conception de la transmission | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Modélisation 3D du prototype | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Impression et usinage des pièces | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Réalisation d'un devis | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Loi entrée sortie DMU | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Assemblage du prototype | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Tests de fonctionnement et ajustements | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Rédaction du rapport et préparation à la soutenance orale | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |

2.3 - Résultats obtenus

Simulation loi entrée-sortie :

| Analytique | Position de départ (haute) | | | |
|---|----------------------------|---------|---------|---------|
| Valeurs theta3 (deg) | 0 | 90 | 180 | 270 |
| Glissière 8a : $\lambda 1$ (mm) | 5,672 | -19,060 | 31,027 | 10,985 |
| Glissière 8b : $\lambda 2$ | -5,672 | 19,060 | -31,027 | -10,985 |
| Bras oblong 5a : $\lambda 5a$ | 11,511 | 13,882 | 13,417 | 11,603 |
| Bras oblong et pivotant : $\theta 5a5b$ (°) | | | | |
| Bras pivotant et rame : $\theta 65b$ | 1,446 | 1,420 | 1,425 | 1,445 |
| Rame : P6 | 91,516 | 91,186 | 91,256 | 91,504 |

Fig 25 : Capture d'écran simulation loi entrée sortie

Il y a un décalage de 5 mm pour les courses des glissières à cause du diamètre non pris en compte des bras lors du calcul analytique. Les résultats restent cohérents avec les deux courses opposées mais égales.

| Loi entrée sortie | Position de départ (haute) | | | |
|---|----------------------------|---------|--------|---------|
| Catia | | | | |
| Valeurs theta3 (°) | 0 | 90 | 180 | 270 |
| Glissière 8a : $\lambda 1$ (mm) | 0 | -21,154 | 11,001 | 37,370 |
| Glissière 8b : $\lambda 2$ | 0 | 37,317 | 11,355 | -21,1 |
| Bras oblong 5a : $\lambda 5a$ | 0 | 10,27 | 14,375 | 10,359 |
| Bras oblong et pivotant : $\theta 5a5b$ (°) | 0 | 112,245 | 29,839 | 112,245 |
| Bras pivotant et rame : $\theta 65b$ | 90 | 128,441 | 63,453 | 31,474 |
| Rame : P6 | 0 | -2,934 | 18,895 | -5,699 |

Malgré une position de départ différente, l'expression de λ_{5a} reste, à quelques écarts près, cohérents avec la simulation numérique.

Ici, $\theta 5a5b$ n'est pas représentatif à cause de la simulation du squelette pilotant. En effet, la pièce fait plusieurs tours sur elle-même à cause de la représentation en 2D, ainsi l'angle ne représente pas la réelle rotation entre les deux bras, il faudrait pour cela reprendre les mesures lors de la conception CAO.

Analytiquement, on constate une course P6 et l'angle θ_{65b} très faible tandis que sur la simulation les valeurs diffèrent.

Présentation du système CAO :

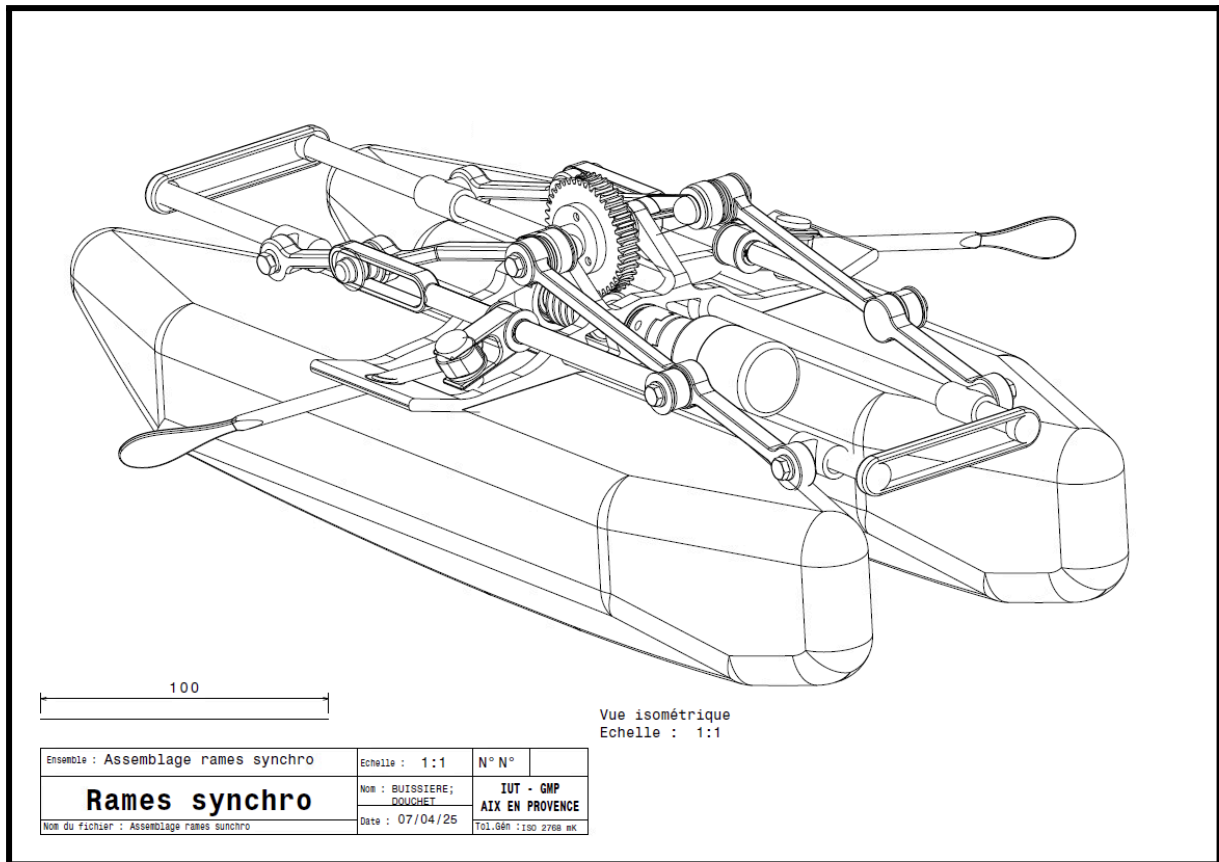


Fig 26 : Mise en plan du système de rames synchro

Mise en plan :

Exemple de mise en plan des pièces voir (cf. [annexe 8](#))

Présentation du livrable :

Montage du système simplifié :



Fig 27 : Photo du système réalisé sous plusieurs vues

Quelques éléments ont été omis à cause d'un manque de temps, mais ils seront ultérieurement installés sur le système.

Retour sur le cahier des charges :

Cahier des charges : ([cf. 1.2.3 - Cahier des charges](#))

Certaines fonctions ne sont pas encore validées ou partiellement en raison d'un manque de temps et de ressources pour l'assemblage de notre système. La FP4 semble être validée par essai manuel, les manivelles semblent fonctionner en synchronisation. Cependant, pour confirmer cela correctement, il serait nécessaire de tester le système afin de vérifier s'il se déplace en ligne droite dans l'eau. Quant à la FP3, elle devrait être validée une fois que notre plaque de support sera fixée sur les flotteurs pour rééquilibrer les défauts de planéité car la poids du système est dans l'ensemble bien réparti. Enfin, la FP2 a été partiellement validée pour certaines pièces. Sur d'autres pièces, il aurait été intéressant de les couvrir de PLA imprégné de colle (Epoxy + Catalyseur) pour éviter le gonflement au contact de l'eau.

Partie 3 - Limites du projet

3.1 - Mise en évidence des verrous technologiques identifiés



La surface irrégulière de notre flotteur rend impossible un placement adéquat de notre bâti. Par conséquent, il était nécessaire de rectifier cette surface, soit en utilisant une lime ou un Dremel pour obtenir une surface relativement lisse, afin d'y fixer une plaque rapidement imprimée en 3D sur les deux flotteurs. Cela offrirait une surface plane pour y installer notre bâti.

Fig 28 : Photo du flotteur déformé

Collision entre le bras et la vis CHC M4x6 lors de la rotation de la manivelle en raison d'une erreur dans l'épaisseur du bras. Il a donc été nécessaire d'utiliser une Dremel pour enlever un peu de matière et ainsi rétablir la possibilité de rotation. Il aurait néanmoins été souhaitable de réimprimer l'élément aux bonnes dimensions, cependant, par manque de temps, cela n'a pas pu se faire.

Fig 29 : Photo de la collision entre le bras et la vis



La rame n'est pas adapté au système, faute d'avoir une modélisation CAO fonctionnelle permettant de vérifier le bon fonctionnement de celui-ci.

3.2 - Rapport d'étonnement

Le design assisté par ordinateur (CAO) du système a pris plus de temps que prévu, ce qui a entraîné des retards sur l'ensemble du projet. Il aurait été judicieux d'effectuer une estimation du temps de CAO, comme évaluer le temps nécessaire pour la fabrication d'une pièce et le multiplier par le nombre total de pièces à produire. Cela aurait fourni une estimation même si elle n'aurait pas été précise.

La CAO comprenant beaucoup de contraintes et ne pouvant vérifier les collisions entre les pièces, il a été judicieux de commencer sur DMU Kinematics une simulation des liaisons entre les pièces. Le temps perdu sur la CAO a empêché de se concentrer sur la simulation qui aurait permis à la fois d'obtenir la loi entrée sortie du système mais également de vérifier les interférences entre les pièces.

La simulation est difficile à mettre en place, demandant du temps et de la rigueur. Les liaisons du graphe de liaisons sont différentes lorsqu'elles doivent être mises sur le système modélisé. Le mécanisme est rapidement surcontraint et cela nécessite de changer les liaisons (passer d'une pivot à une rotule afin de laisser des degrés de libertés) tout en prenant en compte les contraintes entre toutes les pièces. Pour réussir la simulation, il faudrait réaliser une étude complète de l'hyperstatisme du système en cherchant à simplifier les liaisons (en se basant sur les boucles du graphe de liaisons). Ainsi, cela permet d'émettre des doutes sur la véracité du graphe de liaison réalisé en début d'étude et sur l'isostatisme du système.

Partie 4 - Retour critique

4.1 - Choix effectués et leurs conséquences

La réalisation de l'analyse cinématique de façon analytique a été difficile et reste très approximative. La résolution a pris du temps pour un résultat non satisfaisant. Malgré tout, cela a permis de mieux comprendre le fonctionnement du système et de poser les bases de la conception.

La mise des contraintes sur la modélisation CAO a été une erreur et c'est ce qui a pris le plus de temps. Ainsi, la simulation aurait pu être faite plus tôt et aurait évité la collision entre certaines pièces ou encore aurait permis d'avoir un système fonctionnel sur la partie rame.

4.2 - Modification des choix

L'analyse cinématique aurait dû être réalisée de façon numérique. Ainsi, le temps passé à réaliser les calculs aurait été du temps passé sur la réalisation de la simulation du squelette pilotant, plus concrète et moins sources d'erreurs que les calculs et les approximations réalisées pour ceux-ci.

4.3 - Perspectives

Par la suite, il serait intéressant d'industrialiser notre système et d'en augmenter sa taille, ce qui pourrait permettre de réellement tester le système en condition réelle avec les matériaux adaptés aux meilleures performances du système.

De plus, la réalisation d'une étude de l'influence des rames sur la propulsion du système serait intéressante à aborder.

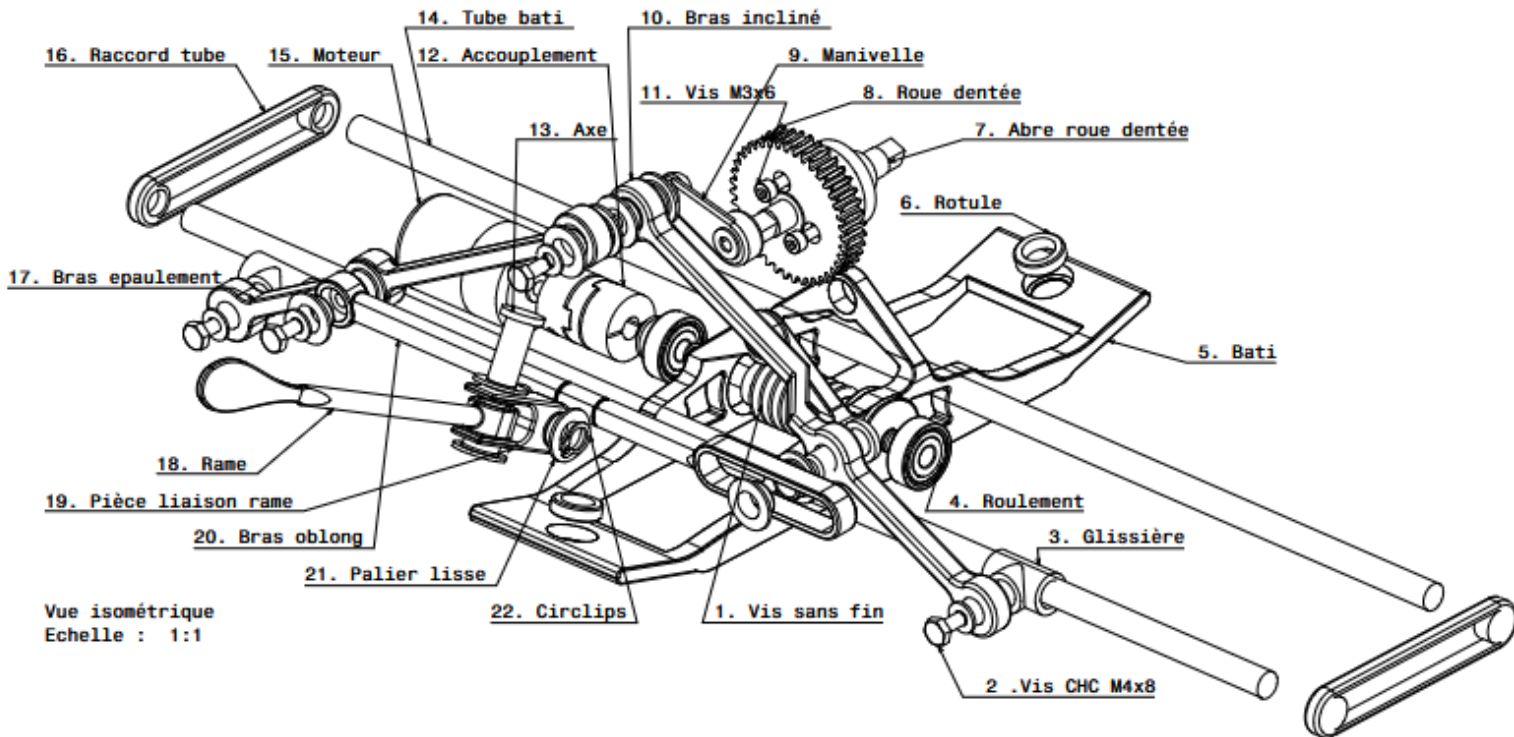
Partie 5 - Conclusion

En somme, même si le projet n'a pas pu être achevé dans les temps en raison des défis rencontrés, l'élaboration d'un prototype tout au long de l'année a favorisé une pensée plus vaste et indépendante sur les problématiques mécaniques et technologiques. Ce projet a permis de développer de nombreuses compétences, depuis la conception d'un produit jusqu'à sa réalisation. La complexité du projet a renforcé notre détermination et nous a poussés à explorer plus en profondeur certaines questions techniques, enrichissant de ce fait notre démarche d'ingénierie. Pour traiter la question : Comment élaborer un modèle permettant de tester le mouvement synchronisé et elliptique des rames ?

La création d'un prototype a démontré comment élaborer un modèle avec un mouvement synchronisé, même si toutes les exigences du cahier des charges ne sont pas respectées. En ce qui concerne le mouvement elliptique, les problèmes associés aux rames rendent impossible la validation de ce point.

ANNEXES

Annexe 1 : Nomenclature



Vue isométrique
Echelle : 1:1

| | | | | | | | | | |
|-----|----|--------------|--------|-----|----|----|---------------|-------|--|
| 10 | 2 | Bras incliné | PLA | | 11 | 6 | Vis M3x6 x5 | Acier | |
| 9 | 2 | Manivelle | PLA | | 12 | 1 | Accouplement | Acier | |
| 8 | 1 | Roue dentée | Résine | | 13 | 4 | Axe | Acier | |
| 7 | 1 | Arbre roue | Acier | | 14 | 2 | Tube bati | Stubs | |
| 6 | 2 | Rotule | Acier | | 15 | 1 | Moteur | x | |
| 5 | 1 | Bati | PLA | | 16 | 2 | Raccord tube | PLA | |
| 4 | 2 | Roulement | Acier | | 17 | 2 | Bras epau | PLA | |
| 3 | 4 | Glissière | PLA | | 18 | 2 | Rame | PLA | |
| 2 | 6 | Vis CHC M4x8 | Acier | | 19 | 2 | Liaison rame | PLA | |
| 1 | 1 | Vis sans fin | Acier | | 20 | 2 | Bras oblong | PLA | |
| Rep | Nb | Designation | Mat | Obs | 21 | 26 | Palier lisses | IGUS | |
| | | | | | 22 | 5 | Circlips | Acier | |

Eléments non représentées dans l'ensemble

| | | | | |
|---|---|---------------|-------------------|--|
| x | 5 | Bague | PLA | |
| x | 2 | Flotteur | PLA + Fibre verre | |
| x | 2 | Cube | PLA | |
| x | 2 | Vis CHC M3x10 | Acier | |

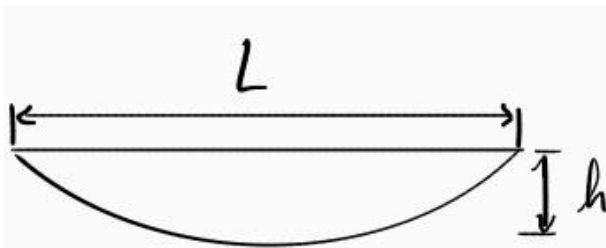
Annexe 2 : Notice de calcul poussée d'Archimède

Hypothèse : la coque de bateau est assimilable à une ellipsoïde

La coque est constituée de deux flotteurs, ce qui divise le poids du bateau par 2. On estime la masse du système à 3.5 kg (flotteurs compris)

Condition de flottaison du prototype : $F_a > P_{\text{bateau}}$

Fa étant la poussée d'Archimède définie par : $F_a = V_t \cdot \rho_{\text{eau}} \cdot g$ et P_{bateau} le poids du bateau.



Vérification avec $L = 470 \text{ mm}$;
 $l = 100 \text{ mm}$ et $h = 110 \text{ mm}$

V_t représente le volume d'un flotteur. V_d est le volume d'un ellipsoïde.

La masse volumique de l'eau,
 $\rho_e = 997 \text{ kg/m}^3$

$$2 \times V_t \times \rho_e \times g > m_b \times g$$

$$V_t > \frac{m_b}{2\rho_e} \quad V_d = \frac{\pi}{3} h L l$$

$$\frac{\pi}{3} h L l > \frac{m_b}{2\rho_e}$$

$$0.00541 \text{ m}^3 > 0,001755 \text{ m}^3$$

Pour optimiser l'encombrement des flotteurs, il est plus judicieux de réduire la poussée d'Archimède. Pour l'optimisation on a comme condition $L > 40 \text{ mm}$ afin que les flotteurs soient plus longs que le système. Ainsi, les flotteurs ont une dimension de : $L = 420 \text{ mm}$, $l = 80 \text{ mm}$ et $h = 60 \text{ mm}$. La condition est bien vérifiée : $0.0021 \text{ m}^3 > 0.001755 \text{ m}^3$

Annexe 3 : Notice de calcul motorisation

Il faut connaître le couple nécessaire à engendrer afin que l'effort de propulsion des rames soit supérieur à la force de traînée et ainsi permettre au bateau de se mouvoir.

L'effort de propulsion d'une rame se définit par : $F_{rame} = C_p \cdot A_{rame} \cdot \Delta v$

Avec C_p le coefficient de poussée (dépend de l'angle de la rame dans l'eau), A_{rame} la surface de la rame en contact avec l'eau et Δv la vitesse relative de la rame dans l'eau. A cause du manque de la loi entrée sortie, il n'est pas possible de déterminer l'effort de propulsion d'une rame, car il est nécessaire de connaître le tirant d'eau, une valeur donnant l'enfoncement du bateau dans l'eau et ainsi connaître la surface en contact avec l'eau et la vitesse relative. Pour simplifier, il est possible de comparer l'effort de traînée avec le couple exercé par les manivelles. L'effort de traînée se définit par : $F_{tr} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{eau} \cdot C_d \cdot A \cdot v^2$

Avec $\rho_{eau} = 997 \text{ kg/m}^3$ la masse volumique de l'eau, $C_d = 0.3$ le coefficient de traînée, A la surface projetée en contact avec l'eau et v la vitesse du rameur dans l'eau.

On souhaite avoir $v = 30$ coups/min avec donc une distance parcouru par coup de rame de :

$$d = 2\pi \cdot P_6 \cdot \frac{\theta_{65b}}{360}$$

en prenant $P_6 = 48 \text{ mm}$ (P_6 max d'après la conception CAO) et $\theta_{65b} = 128^\circ$ (θ_{65b} max). Soit $d = 0.107 \text{ m}$ donc $v_{moy} = \frac{30}{60}d = 0.053 \text{ m/s}$

Ici la surface projetée A correspond à l'avant du flotteur soit : $A = \frac{l \cdot h}{2} = 2400 \text{ mm}^2$. Ayant deux flotteurs, $A_t = 0.0048 \text{ m}^2$. Ainsi, la force de traînée vaut : $F_{tr} = 0.0020 \text{ N}$. Donc le couple nécessaire doit être supérieur à cette valeur, qui est très faible dû à la vitesse faible du bateau.

Vérification avec un moteur $N = 442 \text{ tr/min}$ et $P_{nom} = 1.31 \text{ W}$:

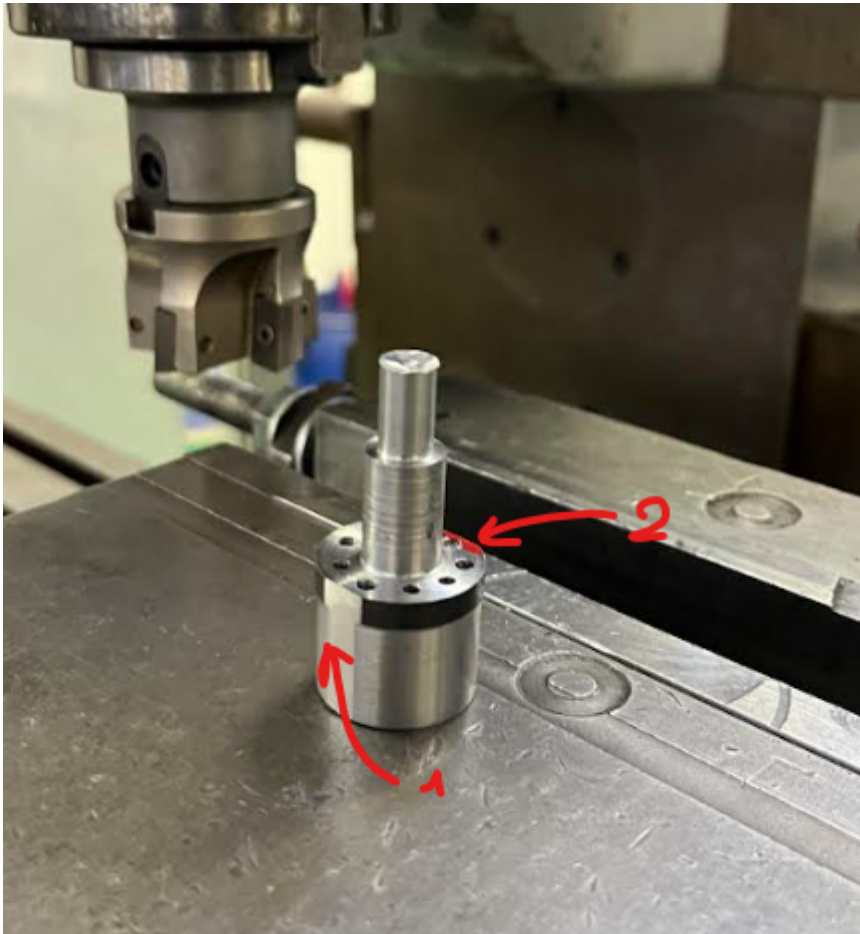
$$C_{moteur} = \frac{P_{nom}}{\omega_{moteur}} \text{ avec } \omega_{moteur} = \frac{\pi}{30} \cdot 442 = 46.29 \text{ rad/s}$$

D'où $C_{moteur} = 0.028 \text{ N.m}$. Ayant une roue et vis sans fin, le couple est multiplié ici par 40 (rapport $Z_{roue}/Z_{filet} = 40/1$). On obtient $C_{manivelle} = C_{moteur} \cdot 40 \cdot \text{rendement}$ avec un rendement estimé à 0.3. D'où $C_{manivelle} = 0.336 \text{ N.m} > F_{tr}$.

Le moteur choisi devrait convenir à notre système.

Annexe 4 : Réalisation arbre roue

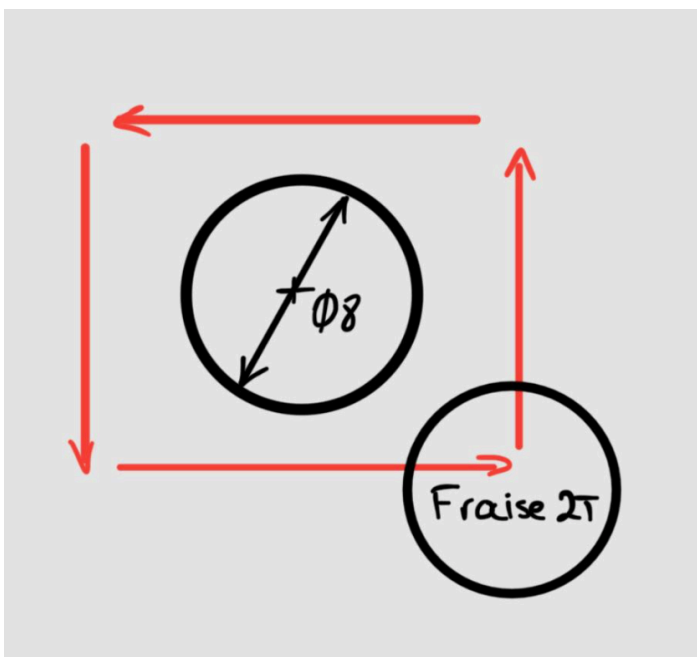
Dans un premier il a été réalisé les premières phase de tournage pour par la suite réaliser les face planes (1) et (2) qui permettent de se positionner dans les mors :



Une fois les surfaces planes réalisés il est possible de se positionner dans les mors comme ceci :



Une fois le positionnement à l'aide de cale et d'un bon montage, il est possible de pinuler afin d'avoir le centre de notre diamètre pour la réalisation des carrés, une fois le pinulage fait il est possible de réaliser les carrés comme ceci :



Dimensions de carré voulu 5.5x5.5 avec une profondeur de 6.8mm donc nous réalisons petit à petit notre carré par passes de 0.5mm avec un contournage comme ci-contre avec une fraise 2T diamètre 20mm. Par la suite il suffit de retourner la pièce et de faire de même pour l'autre carré la symétrie est garantie par les plat réalisés.

Annexe 5 : Choix du montage

| | Arbre long ($L > 3.d$) | Arbre court ($L < 2.d$) |
|---|---|---|
| Bagues Intérieures Tournantes / Charge | <p>« arbre long BI serrées »</p> <p>Arbre</p> <p>Serré Glissant</p> | <p>« arbre court BI serrées » ou « en X »</p> <p>Arbre</p> <p>Serré Glissant</p> |
| Bagues Extérieures Tournantes / Charge | <p>« arbre long BE serrées »</p> <p>Arbre</p> <p>Glissant Serré</p> | <p>« arbre court BE serrées » ou « en O »</p> <p>Jeu 0.2 à 0.4</p> <p>Arbre</p> <p>Glissant Serré</p> |
| | Montage « fixe » | Montage « flottant » |

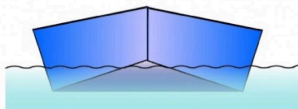
Il est préconisé de choisir ce montage car les BI doivent être serrés avec l'arbre et le BE tournante par rapport à la charge. Arbre long car $L_{Pièce} : 72.2mm ; \varnothing_{pièce} : 6mm$ donc : $(72.2 > 18)$ donc choix de l'arbre long. [6]

Annexe 6 : Choix de la forme de coque

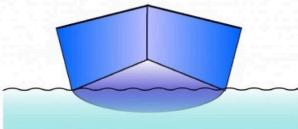


Il est conseillé d'utiliser ce type de coque dans notre système car il assure une meilleure flottabilité et stabilité ce qui est très important dans notre système afin d'en assurer sa bonne flottabilité.

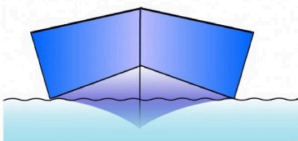
Variantes de coques



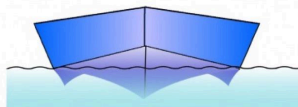
- Coque à fond plat:**
- **les + :** excellent pour la navigation en eaux calmes
 - **les - :** pas stable
prudence des un léger capot



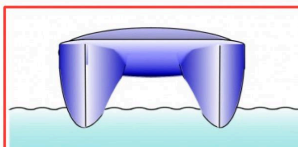
- Coque à fond rond:**
- **les + :** très efficaces pour le fluvial
glisse sur l'eau
 - **les - :** Vitesse particulièrement lent
roulis très prononcé avec un peu de houle



- Coque à fond en V:**
- **les + :** V constant = un très bon passage à la mer
V évolutif = motorisation raisonnable
V plat = stabilité au mouillage
 - **les - :** V constant = déjaugage difficile
V évolutif = tape par mer formée
V plat = Tape des le premier clapot



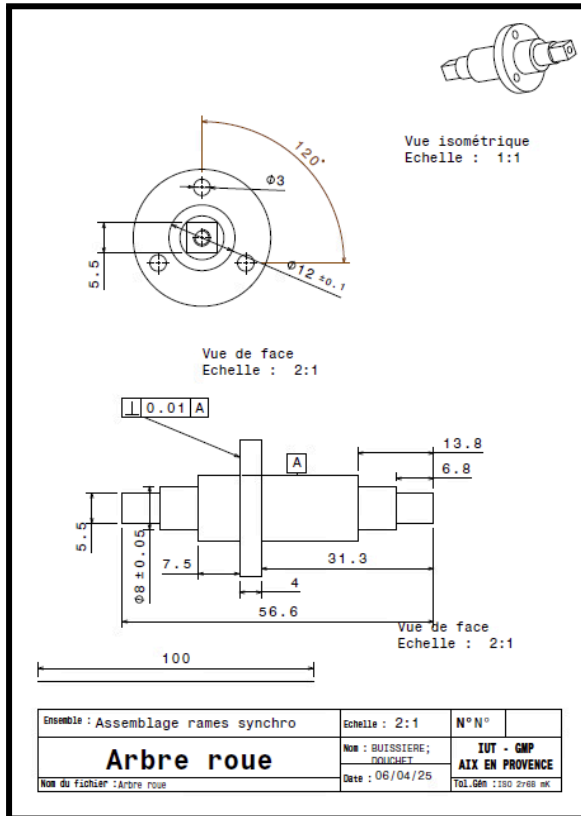
- Coque en triple V (ou double V):**
- **les + :** très stables
 - **les - :** trop de surface mouillée
- Ex: ailes de mouettes et plus éloigné semi-rigide



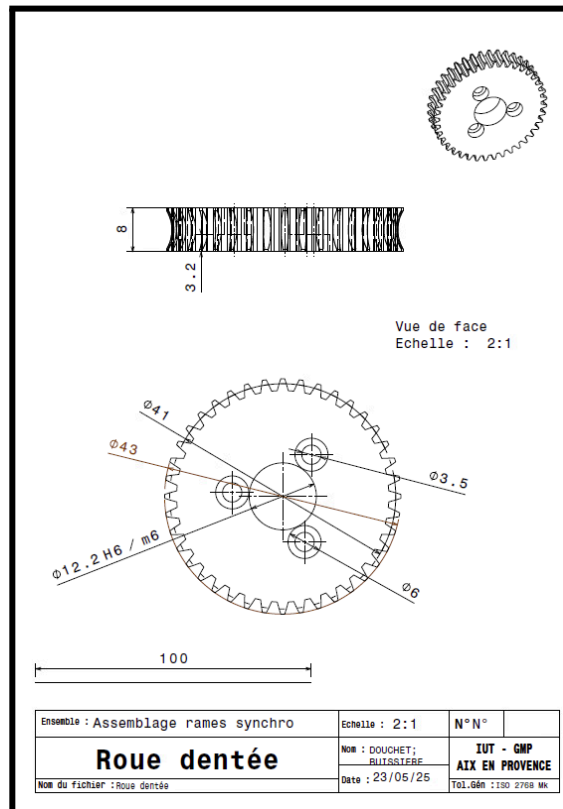
- Multicoques:**
- **les + :** stabilité
vitesse
convient par tout temps
meilleure glisse qu'un mono-coque
surface de pont
 - **les - :** Prend plus de place

Annexe 7 : Exemple de mise en plan

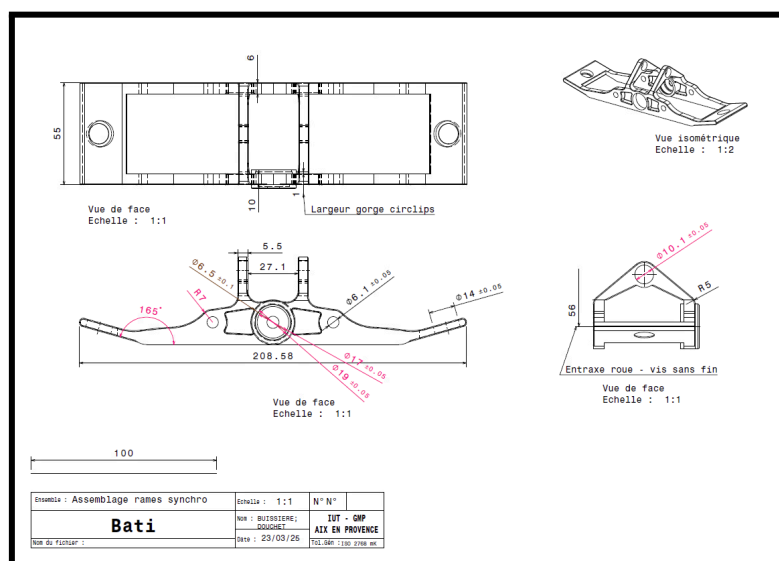
Arbre roue :



Roue dentée :



Bâti :



BIBLIOGRAPHIE

[1] : [Гребной тренажер / Rowing Machine](#)

Fig 1 : [Cycle de vie d'un produit industriel : exemple détaillé](#)

Norme : [NF EN 16311 - Normes](#)

Fig 2 et 3: Méthode AF (Analyse Fonctionnelle) ou F.A.S.T (Function Analysis Systems Technique, C. Bytheway, 1965). *Gestion projets, Spécification et Conception de Produits Nouveaux* JML

https://ametice.univ-amu.fr/pluginfile.php/9139993/mod_resource/content/0/Cahier%20des%20Charges%20Simplifié.pdf

[2] : [Row Boat Mechanism | 3D CAD Model Library | GrabCAD](#)

[3] : [Mechanical rowing boat](#)

[4] : Romain Labbe. Quelques problèmes d'optimisation de trainée : De la propulsion par rame à la collecte d'aérosol. Université Paris Saclay (COMUE), 2018. Français. (NNT : 2018SACLX080)

[5] : Degré hyperstatisme : [Chebychev–Grübler–Kutzbach criterion - Wikipedia](#)

[6] Roulements :
https://ametice.univ-amu.fr/pluginfile.php/9017447/mod_resource/content/0/R3.05%20cours%20Roulements%20BTPM%20v2A24%20prof.pdf

[7] Engrenages :
https://ametice.univ-amu.fr/pluginfile.php/9017275/mod_resource/content/2/R4.05_Cours-Enseignants_2024%20VFK.pdf

[8] : GSTI, Fanchon, 2024