



UFR Sciences et Techniques

L2 Mathématiques Renforcée

Rapport du Projet Personnel de Recherche

Étude des matériaux et optimisation de la densité du bateau autonome Zéphyr

Mathias MAYAN

Tuteur : Monsieur ERSOY

Laboratoire : IMATH

En partenariat avec l'association HydroSharks



Année universitaire 2025–2026

Table des matières

Remerciements	2
Résumé	3
1 Présentation générale du Zéphyr	4
2 Étude hydrodynamique du safran	6
3 Étude et comparaison des matériaux	12
3.1 Zones étudiées	12
3.2 Critères de sélection	13
3.3 Comparaison synthétique des matériaux	13
3.4 Recommandations	14
3.5 Conclusion	15
4 Étude dynamique et influence des densités de matériaux	16
5 Discussion et choix final des matériaux	21
6 Conclusion générale	22
A Annexes	24

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement mon tuteur, Monsieur ERSOY, pour son accompagnement, sa disponibilité et son soutien tout au long de ce projet. Ses conseils et son encadrement m'ont permis d'avancer efficacement dans la réalisation de cette étude et d'approfondir mes connaissances dans les domaines de l'hydrodynamique et de la modélisation.

Je remercie également l'association HydroSharks pour m'avoir fourni les différents documents techniques et ressources nécessaires à la réalisation de ce mémoire. Leur aide a été précieuse pour comprendre les enjeux techniques liés au projet Zéphyr et mener cette étude dans de bonnes conditions.

Enfin, je souhaite remercier Monsieur Nugue (ancien étudiant de SeaTech) : pour le temps qu'il m'a accordé ainsi que pour la démonstration du logiciel de modélisation Flow3D, qui m'a permis de mieux appréhender les outils de simulation numérique utilisés dans le cadre de ce projet.

Résumé

Ce mémoire porte sur l'étude des matériaux et du comportement dynamique du Zéphyr, un trimaran autonome développé dans le cadre du projet HydroSharks SeaTech. L'objectif général est d'analyser l'influence des choix de matériaux sur la masse, la stabilité, la résistance mécanique et la réponse dynamique du bateau. Le Zéphyr étant destiné à naviguer de manière autonome sur plusieurs jours, voire plusieurs semaines, il doit présenter un bon compromis entre légèreté, rigidité, robustesse, stabilité et efficacité énergétique.

L'étude est organisée en deux grandes parties. La première est consacrée au safran du trimaran, à son rôle hydrodynamique ainsi qu'aux efforts mécaniques auxquels il est soumis. La seconde partie porte sur l'étude des matériaux et l'influence de leur densité sur le comportement dynamique du Zéphyr. Une attention particulière est portée au safran, élément essentiel de la manœuvrabilité du bateau. Les forces hydrodynamiques qui s'appliquent sur celui-ci sont étudiées à travers les notions de portance, de traînée et de moment autour de l'axe de rotation.

Dans un second temps, le mémoire compare plusieurs familles de matériaux utilisables pour les différentes parties du bateau : aluminium, composites, fibre de carbone, contre-plaqué et matériaux de flottabilité. Cette comparaison est complétée par une étude de résistance permettant de vérifier que les contraintes mécaniques restent inférieures aux contraintes admissibles.

Enfin, une partie importante est consacrée à l'analyse de simulations dynamiques. Les courbes de coordonnée verticale, de vitesse verticale et de déplacement vertical du centre de masse sont étudiées afin d'évaluer l'effet de différentes densités de matériaux sur le comportement global du bateau.

1. Présentation générale du Zéphyr

Description du projet

Le Zéphyr est un trimaran autonome destiné à des missions de recherche océanographique. Voir A.1. Son architecture repose sur une coque principale, deux flotteurs latéraux et des bras de liaison. Ce choix de géométrie permet d'obtenir une bonne stabilité transversale tout en conservant une structure relativement légère.

Le bateau possède une coque principale d'environ 4.7 m de long. Les deux flotteurs latéraux mesurent environ 2.3 m chacun et sont reliés à la coque centrale par des bras métalliques. La largeur totale du trimaran atteint environ 3 m. Cette largeur importante augmente le bras de levier entre la coque principale et les flotteurs, ce qui améliore la stabilité au roulis.

Le Zéphyr est également équipé de deux mâts et de voiles rigides. Ces voiles permettent d'exploiter l'énergie du vent pour assurer la propulsion. L'autonomie énergétique est complétée par des panneaux solaires, dont le rôle est d'alimenter les systèmes électroniques embarqués, les capteurs, les actionneurs et les programmes de navigation.

Les vitesses retenues pour l'étude correspondent aux conditions de navigation définies dans le cahier des charges du Zéphyr. Trois cas ont été considérés afin d'évaluer le comportement du bateau dans différentes situations :

- une vitesse minimale de $V_{\min} = 1,54 \text{ m s}^{-1}$;
- une vitesse maximale de $V_{\max} = 5,14 \text{ m s}^{-1}$;
- une vitesse moyenne de $V_{\text{moy}} = 3,34 \text{ m s}^{-1}$.

La vitesse moyenne a été obtenue en calculant la moyenne arithmétique des vitesses minimale et maximale. Ces trois valeurs ont ensuite été utilisées pour déterminer les coefficients hydrodynamiques ainsi que les efforts exercés sur le safran dans les différentes configurations de navigation étudiées.

Fonction des principaux éléments

Les principaux éléments du Zéphyr peuvent être classés selon leur fonction :

- la **coque principale** assure la flottabilité principale et accueille les systèmes embarqués ;
- les **flotteurs** assurent la stabilité latérale du trimaran ;
- les **bras de liaison** transmettent les efforts entre la coque principale et les flotteurs ;
- la **dérive** limite la dérive latérale du bateau sous l'effet du vent ;
- le **safran** permet de contrôler la trajectoire du bateau ;
- les **voiles rigides** assurent la propulsion ;
- les **panneaux solaires** participent à l'autonomie énergétique.

Le bon fonctionnement du Zéphyr dépend donc de l'interaction entre ces différents éléments. Une modification de matériau sur une partie du bateau peut avoir des conséquences sur la masse totale, la position du centre de gravité, la stabilité et la réponse dynamique.

Cahier des charges simplifié

Le cahier des charges du Zéphyr peut être résumé par les critères suivants :

TABLE 1.1 – Cahier des charges simplifié du Zéphyr

Critère	Objectif ou contrainte
Type de bateau	Trimaran autonome
Longueur de la coque principale	Environ 4.7 m
Longueur des flotteurs	Environ 2.3 m
Largeur totale	Environ 3 m
Propulsion	Voiles rigides
Énergie embarquée	Panneaux solaires
Mission	Recherche océanographique
Autonomie	Plusieurs jours à plusieurs semaines
Milieu	Eau de mer, houle, vent, corrosion
Objectifs mécaniques	Résistance, rigidité, stabilité, faible masse
Vitesse min	$1,54 m s^{-1}$
Vitesse moyenne	$3,34 m s^{-1}$
Vitesse max	$5,14 m s^{-1}$

Contraintes liées au milieu marin

Le milieu marin est un environnement contraignant. Les matériaux doivent résister à l'humidité, à la corrosion, aux variations de température, aux chocs, aux efforts cycliques et à l'exposition prolongée au soleil. Les pièces immergées sont soumises à des forces hydrodynamiques, tandis que les parties émergées subissent les efforts du vent et les effets de la houle.

La corrosion est particulièrement importante pour les pièces métalliques. L'aluminium, par exemple, est intéressant pour sa légèreté et sa bonne résistance mécanique, mais il doit être protégé correctement lorsqu'il est utilisé en milieu marin. Les composites, quant à eux, présentent une bonne résistance à la corrosion mais nécessitent une fabrication plus complexe.

La masse représente également une contrainte majeure. Un bateau trop lourd demandera davantage d'énergie pour se déplacer et pourra perdre en réactivité. À l'inverse, une structure trop légère peut devenir plus sensible aux oscillations et aux perturbations extérieures. Il est donc nécessaire de trouver un compromis entre masse, rigidité, résistance et stabilité.

2. Étude hydrodynamique du safran

Rôle du safran

Le safran est un élément fondamental pour la manœuvrabilité du Zéphyr. Il est situé à l'arrière du bateau et permet de modifier la direction en déviant le flux d'eau. Lorsqu'il est orienté avec un certain angle par rapport à l'écoulement, il crée une force hydrodynamique qui génère un moment permettant de faire tourner le bateau.

Le système de gouverne est composé de deux parties principales :

- la **pale du safran**, partie immergée qui interagit directement avec l'eau ;
- la **mèche**, axe de rotation qui relie le safran à la structure du bateau.

Le safran doit être suffisamment rigide pour ne pas se déformer sous l'effet des efforts

hydrodynamiques. Il doit aussi être assez léger pour limiter l’inertie du système de commande. Le choix du matériau est donc important : un matériau trop flexible réduirait la précision de la trajectoire, tandis qu’un matériau trop lourd augmenterait les efforts sur le système de commande.

Choix du profil NACA 0010

Le safran étudié utilise un profil de type NACA 0010. Ce profil est symétrique, ce qui signifie qu’il ne possède pas de cambrure. Cette caractéristique est adaptée à un safran car celui-ci doit fonctionner de manière similaire lorsque le bateau tourne à bâbord ou à tribord.

Le nombre 0010 indique que l’épaisseur maximale du profil représente 10 % de la corde. Ce choix constitue un compromis entre plusieurs exigences :

- une épaisseur suffisante pour assurer une bonne rigidité ;
- une traînée limitée pour ne pas pénaliser l’avancement ;
- une portance correcte aux faibles angles d’incidence ;
- une fabrication plus simple qu’un profil très fin ou très complexe.

Un profil trop épais augmenterait la traînée, tandis qu’un profil trop mince pourrait manquer de rigidité et favoriser certains phénomènes indésirables comme la cavitation à forte sollicitation. Le NACA 0010 constitue donc un choix cohérent pour un safran de trimaran autonome. Les caractéristiques de ce profil sont présentées en annexe [A.2.\[3\]](#)

Forces appliquées sur le safran

Lorsque le bateau avance, l’eau s’écoule autour du safran. Si celui-ci est incliné d’un angle d’incidence α , deux forces principales apparaissent (voir schéma en annexe [A.3](#)).

- la **force de portance** F_l , perpendiculaire à l’écoulement ;
- la **force de traînée** F_d , parallèle à l’écoulement et opposée au mouvement.

Ces forces peuvent être exprimées par les relations classiques :

$$F_l = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_l$$

$$F_d = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_d$$

où ρ est la masse volumique de l'eau, S la surface du safran, V la vitesse du bateau, C_l le coefficient de portance et C_d le coefficient de traînée.

La force résultante appliquée au safran peut être calculée par :

$$F_{th} = \sqrt{F_l^2 + F_d^2}$$

Cette force crée ensuite un moment autour de l'axe de rotation du safran :

$$M = F_{th} \times d$$

où d représente le bras de levier entre le point d'application de la force et l'axe de rotation.

Application numérique

Dans cette étude, nous nous appuyerons sur les données fournies par l'association Hydro-Sharks. La surface de référence S ainsi que la masse volumique ρ proviennent directement de leurs documents techniques. Ces différentes données serviront de base aux calculs.

Dans l'étude initiale, la surface du safran a été évaluée à :

$$S = 0.172 \text{ m}^2$$

La masse volumique de l'eau a été prise égale à :

$$\rho = 1000 \text{ kg m}^{-3}$$

Cette valeur correspond à l'eau douce. Même si le Zéphyr est destiné à évoluer en mer Méditerranée, où la masse volumique est plus proche de 1025 kg m^{-3} , l'utilisation de 1000 kg m^{-3} permet de rester cohérent avec les calculs précédents et les documents techniques utilisés.

Pour un angle de débattement de $\pm 10^\circ$, la force de poussée maximale relevée sur un graphique fourni par HydroSharks Le graphique utilisé pour cette estimation est présenté en Annexe [A.4](#).

$$F_{th,max} = 2235 \text{ N}$$

La distance entre l'axe et le point d'application de la force est :

$$d = 12.293 \text{ mm} = 0.012\,293 \text{ m}$$

Le moment maximal vaut donc :

$$M_{max} = F_{th,max} \times d$$

$$M_{max} = 2235 \times 0.012293 = 27.474\,855 \text{ N m}$$

Ce résultat permet de dimensionner le système de commande du safran. L'actionneur choisi devra être capable de fournir un couple supérieur à cette valeur, en tenant compte d'un coefficient de sécurité.

Interprétation physique

L'effort appliqué au safran augmente avec le carré de la vitesse. Cela signifie qu'une augmentation modérée de la vitesse peut entraîner une augmentation importante des forces hydrodynamiques. À basse vitesse, le safran est moins efficace car les forces générées sont plus faibles. À haute vitesse, il devient plus réactif mais les contraintes mécaniques augmentent fortement.

Le dimensionnement du safran doit donc prendre en compte deux situations opposées :

- à basse vitesse, il faut conserver une manœuvrabilité suffisante ;
- à haute vitesse, il faut éviter une surcharge mécanique de la mèche et de la structure.

Cette double contrainte justifie l'utilisation d'un matériau léger, rigide et résistant comme le composite carbone-époxy pour la pale du safran, associé à une mèche métallique capable de transmettre les efforts.

Etude Résistance du safran

Cette étude vise à vérifier la résistance du safran face aux efforts exercés lors du mouvement du Zéphyr. Celui-ci est composé d'un corps en composite fibre de carbone-époxy (CFRP) et d'un bras en aluminium (Al). Grâce à MatWeb, nous avons pu établir le

tableau comparatif suivant des propriétés mécaniques des matériaux étudiés.[5][6]

TABLE 2.1 – Comparaison des propriétés mécaniques du CFRP et de l’alliage d’aluminium 6061-T6

Propriété	CFRP (époxy/fibre de carbone)	Aluminium 6061-T6
Masse volumique ρ (kg.m ⁻³)	1420	2700
Module d’Young E (GPa)	105	69
Résistance à la traction (MPa)	965	310
Limite d’élasticité (MPa)	1260	276
Allongement à rupture (%)	1.5	12
Résistance à la corrosion	Excellente	Très bonne
Rapport résistance/masse	Très élevé	Élevé
Coût	Très élevé	Modéré
Facilité de mise en œuvre	Moyenne	Excellente
Applications typiques	Aéronautique, compétition, nautisme	Structures légères, nautisme, aéronautique

Pour le CFRP, MatWeb donne une limite élastique moyenne en traction de :

$$R_e = 1260 \text{ MPa}$$

En prenant un coefficient de sécurité :

$$s = 2$$

on obtient la contrainte pratique admissible :

$$R_{pe} = \frac{R_e}{s}$$

$$R_{pe} = \frac{1260}{2} = 630 \text{ MPa}$$

La contrainte normale maximale appliquée au safran est donnée par :

$$\sigma_{\max} = \frac{F_{th,\max}}{S}$$

avec :

$$F_{th,\max} = 2235 \text{ N} \quad S = 0.172 \text{ m}^2$$

Ainsi :

$$\sigma_{\max} = \frac{2235}{0.172} = 12997 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{\max} = 0.013 \text{ MPa}$$

On compare alors la contrainte maximale à la contrainte admissible :

$$\sigma_{\max} < R_{pe}$$

$$0.013 < 630$$

La condition de résistance est donc largement vérifiée.

On peut aussi calculer le coefficient de sécurité réel :

$$n = \frac{R_{pe}}{\sigma_{\max}}$$

$$n = \frac{630}{0.013} \simeq 4.85 \times 10^4$$

Ainsi, la contrainte maximale appliquée au safran est très inférieure à la contrainte admissible du CFRP. Le matériau possède donc une marge de sécurité très importante et peut supporter les efforts considérés dans cette étude. Cette vérification reste néanmoins une estimation simplifiée, car elle considère une contrainte normale uniformément répartie sur la surface du safran.

3. Étude et comparaison des matériaux

Objectif de l'étude matériaux

L'objectif de cette partie est d'analyser les différents matériaux pouvant être utilisés pour le Zéphyr. Le choix des matériaux influence directement plusieurs paramètres :

- la masse totale du bateau ;
- la position du centre de gravité ;
- la résistance mécanique ;
- la rigidité de la structure ;
- la durabilité en milieu marin ;
- le coût et la facilité de fabrication ;
- le comportement dynamique du bateau.

3.1 Zones étudiées

Les principales zones du bateau nécessitant une sélection spécifique de matériaux sont les suivantes :

- Coque centrale et flotteurs ;
- Bras de liaison (akas) ;
- Foils, dérive et safran ;
- Mât et gréement ;
- Structure interne et renforts.

Chaque élément est soumis à des contraintes mécaniques différentes. Il est donc nécessaire d'adapter le matériau utilisé afin d'obtenir le meilleur compromis entre performance et fiabilité.

3.2 Critères de sélection

Afin de comparer les différents matériaux, plusieurs critères ont été retenus :

- Faible masse ;
- Bonne rigidité mécanique ;
- Résistance à la corrosion et aux UV ;
- Résistance à la fatigue ;
- Coût raisonnable ;
- Impact environnemental limité.

Ces critères permettent d'évaluer objectivement les avantages et les limites de chaque famille de matériaux.

3.3 Comparaison synthétique des matériaux

Bois

Les bois marins restent très utilisés dans la construction nautique grâce à leur faible coût et à leur facilité de mise en œuvre.[2] Ils constituent souvent une solution intéressante pour certaines parties structurelles.

Matériau	Densité	Durabilité marine	Coût
Contreplaqué marine	550	Bonne	Faible
Cèdre rouge	380	Bonne	Moyen
Balsa	160	Moyenne	Moyen

Métaux

Les métaux sont principalement utilisés dans les zones nécessitant une forte résistance mécanique ou pour les éléments de fixation. [2] Leur masse importante limite cependant leur utilisation sur l'ensemble du bateau.

Matériau	Densité	Durabilité marine	Coût
Aluminium 5083	2660	Bonne	Moyen
Titane Ti-6Al-4V	4430	Excellente	Très élevé
Inox 316L	8000	Bonne	Élevé

Composites

Les matériaux composites sont aujourd’hui les plus utilisés dans les bateaux de compétition et les navires performants. Leur excellent rapport masse/rigidité constitue leur principal avantage.[4]

Matériau	Densité	Durabilité marine	Coût
Fibre de verre (GFRP)	1900	Excellente	Faible
Carbone (CFRP)	1600	Excellente	Très élevé
Kevlar	1400	Excellente	Élevé
Sandwich mousse PVC	80	Excellente	Moyen

Matériaux alternatifs

Des matériaux plus respectueux de l’environnement sont également étudiés. Bien qu’ils soient généralement moins performants que les composites traditionnels, ils représentent des pistes intéressantes pour l’avenir.

Matériau	Densité	Durabilité marine	Coût
Lin/époxy	1300	Moyenne	Faible
Composite recyclé	1700	Bonne	Faible
Naturels améliorés	900	Moyenne	Faible

À la lumière de cette comparaison, les composites apparaissent comme les matériaux les plus performants pour les éléments stratégiques du trimaran. Les matériaux naturels restent toutefois intéressants pour réduire l’impact environnemental du projet.

3.4 Recommandations

Le tableau suivant présente les matériaux les plus adaptés pour chaque zone du bateau en fonction des contraintes identifiées précédemment.

Zone	Matériau recommandé
Bordés et cloisons	Bois + époxy ou GFRP
Étrave et impacts	Kevlar ou carbone/Kevlar
Fond de coque	Sandwich carbone + mousse PVC
Pont principal	GFRP ou bois + époxy
Akas	CFRP unidirectionnel
Jonctions structurelles	Carbone/Kevlar
Foils	CFRP
Dérive	CFRP ou GFRP
Safran	CFRP ou Kevlar
Mât	CFRP ou aluminium marin
Cadènes	Inox 316L ou titane
Cloisons internes	Bois + époxy ou GFRP
Renforts locaux	CFRP ou Kevlar

Ces recommandations permettent de limiter la masse globale du bateau tout en garantissant une résistance suffisante face aux efforts rencontrés lors de la navigation.

3.5 Conclusion

L'étude met en évidence la supériorité des matériaux composites pour la majorité des éléments du trimaran Zéphyr. La fibre de verre constitue une solution fiable et économique pour les pièces courantes tandis que la fibre de carbone offre les meilleures performances lorsque la rigidité et le gain de masse sont prioritaires. Le Kevlar complète ces matériaux dans les zones exposées aux impacts.

Enfin, l'utilisation ponctuelle de métaux tels que l'aluminium, l'inox ou le titane reste indispensable pour les assemblages et les points de fixation fortement sollicités. L'ensemble de ces choix constitue une base cohérente pour les futures simulations et pour le dimensionnement final du projet.

Ainsi, la résistance normale constitue une première validation, mais elle ne remplace pas

une analyse mécanique complète par éléments finis ou par essais expérimentaux.

4. Étude dynamique et influence des densités de matériaux

Objectif des simulations dynamiques

Après avoir étudié la résistance des matériaux, il est nécessaire d'analyser leur influence sur le comportement dynamique global du bateau. En effet, deux matériaux peuvent être tous les deux résistants, mais produire des comportements très différents lorsqu'ils sont intégrés à la structure complète du trimaran.

L'objectif de cette partie est donc d'étudier l'effet de différentes densités de matériaux sur le mouvement vertical du centre de masse du Zéphyr. Trois grandeurs sont analysées :

- la coordonnée verticale Z du centre de masse ;
- la vitesse verticale du centre de masse ;
- le déplacement vertical du centre de masse.

Ces grandeurs permettent d'évaluer la stabilité verticale du bateau, son amortissement et sa sensibilité aux perturbations.

Méthodologie de simulation

Les simulations consistent à modifier la densité de certains matériaux composant le bateau, puis à observer la réponse dynamique du centre de masse. Les courbes obtenues permettent de comparer plusieurs configurations. Chaque couleur correspond à une configuration différente de matériau ou de densité.

Dans ce mémoire, les trois configurations seront appelées :

Configuration	Densité testée	Matériau associé
Bleue	800	Bois + époxy, contreplaqué marine stratifié, ou sandwich plus épais en fibre de verre
Rouge	600	Sandwich fibre de verre + mousse PVC ou carbone/verre + mousse PVC
Verte	400	Sandwich carbone + mousse PVC

Analyse de la coordonnée verticale du centre de masse

L'évolution de la coordonnée verticale du centre de masse des trois configurations étudiées (bleue, rouge et verte) est présentée en Annexe [A.5](#).

On observe que les trois courbes présentent un comportement oscillatoire. Cela signifie que le centre de masse du bateau ne reste pas à une hauteur constante, mais se déplace verticalement sous l'effet des sollicitations dynamiques. Ce type de mouvement peut être associé à une réponse à la houle, aux variations de poussée d'Archimède ou à l'inertie du bateau.

La configuration bleue présente les amplitudes négatives les plus importantes. Elle descend plus bas que les autres configurations, notamment autour de $t \approx 1$ et $t \approx 7.3$. Cela indique un mouvement vertical plus marqué, donc une stabilité verticale moins favorable.

La configuration verte reste globalement plus haute que les deux autres. Ses oscillations semblent moins pénalisantes, même si elle présente également des variations importantes. Elle semble donc mieux conserver une position verticale moyenne positive ou moins négative.

La configuration rouge occupe une position intermédiaire. Ses oscillations sont moins fortes que celles de la courbe bleue, mais plus marquées que celles de la courbe verte dans certaines zones.

Physiquement, ces différences peuvent s'expliquer par l'influence de la masse et de l'inertie. Une structure plus dense possède une inertie plus importante, ce qui peut réduire certaines accélérations mais aussi modifier la position d'équilibre du bateau. À l'inverse, une structure plus légère peut réagir plus rapidement aux perturbations, ce qui peut augmenter l'amplitude des oscillations.

Analyse de la vitesse verticale du centre de masse

L'évolution de la coordonnée verticale du centre de masse des trois configurations étudiées (bleue, rouge et verte) est présentée en Annexe [A.5](#).

La vitesse verticale permet de mesurer la rapidité avec laquelle le centre de masse monte ou descend. Une vitesse verticale élevée signifie que le bateau subit des variations rapides de position. Cela peut être problématique car des mouvements brusques peuvent perturber les capteurs, les systèmes embarqués, la stabilité et le contrôle automatique.

La courbe bleue montre une forte variation négative au début de la simulation, avec une valeur proche de -0.7 . Cela traduit une descente rapide du centre de masse au début du mouvement. La même configuration présente ensuite des variations importantes, positives et négatives, ce qui suggère un comportement plus brusque.

Les courbes verte et rouge présentent également des oscillations, mais leurs variations initiales semblent moins extrêmes que celles de la courbe bleue. Autour de $t \approx 7.8$, les trois configurations atteignent un pic positif important. Cela indique une remontée rapide du centre de masse dans les trois cas.

L'analyse de la vitesse verticale est particulièrement importante car elle renseigne sur l'amortissement. Une configuration bien amortie doit limiter les variations rapides de vitesse. Une vitesse trop oscillante traduit une réponse dynamique moins stable.

Analyse du déplacement vertical du centre de masse

L'évolution du déplacement vertical du centre de masse des trois configurations étudiées est présentée en Annexe [A.7](#).

Le déplacement vertical représente l'écart par rapport à une position de référence. Cette grandeur est directement liée au confort dynamique et à la stabilité globale du bateau. Dans le cas d'un trimaran autonome, il est préférable de limiter les déplacements verticaux excessifs afin de préserver la précision des capteurs et la fiabilité de la navigation.

La configuration bleue présente les déplacements négatifs les plus importants. Elle atteint environ -0.4 dans les zones les plus défavorables. Cela indique une amplitude de mouvement élevée. Une telle configuration peut donc être moins adaptée si l'objectif est de limiter les oscillations verticales.

La configuration verte présente des déplacements plus faibles. Elle semble mieux maintenir le bateau proche de sa position de référence. Ce comportement peut traduire une meilleure

stabilité ou un meilleur compromis entre masse et flottabilité.

La configuration rouge reste intermédiaire. Elle suit globalement la forme des autres courbes, mais avec des amplitudes moins extrêmes que la bleue et plus marquées que la verte.

Influence de la densité de la coque lors d'un impact avec une vague

Afin d'évaluer l'influence de la densité du matériau constituant la coque du trimaran Zéphyr, trois simulations numériques ont été réalisées sous Flow-3D Hydro pour des densités de 400, 600 et 800 kg.m^{-3} . Les conditions de simulation ont été conservées identiques afin de comparer uniquement l'effet de la masse volumique du matériau.

La simulation numérique correspondant à la configuration verte, associée à une densité de 400 kg.m^{-3} , est présentée en Annexe A.8.[7]

Pour une densité de 400 kg.m^{-3} , le bateau présente une flottabilité importante. Lors de l'impact avec une vague de vitesse 4 m.s^{-1} , la coque reste relativement haute sur l'eau. Cette configuration limite l'enfoncement mais augmente les mouvements verticaux du navire, ce qui peut réduire sa stabilité dans des conditions de mer agitée.

La simulation numérique correspondant à la configuration rouge, associée à une densité de 600 kg.m^{-3} , est présentée en Annexe A.9.[7]

Pour une densité de 600 kg.m^{-3} , la répartition des pressions et la position du navire dans l'eau apparaissent plus équilibrées. Au moment du choc avec la vague, le niveau de l'eau se situe approximativement au milieu de la hauteur de la coque. Cette situation permet de répartir les efforts hydrodynamiques sur une plus grande surface tout en conservant une bonne stabilité. Le bateau présente alors un compromis intéressant entre flottabilité, résistance aux impacts et tenue à la mer.

La simulation numérique correspondant à la configuration bleue, associée à une densité de 800 kg.m^{-3} , est présentée en Annexe A.10.[7]

Pour une densité de 800 kg.m^{-3} , le bateau s'enfonce davantage dans l'eau. Bien que la stabilité soit améliorée par l'augmentation de la masse, les efforts exercés sur la coque deviennent plus importants et la surface mouillée augmente, ce qui peut entraîner une hausse de la traînée hydrodynamique et une diminution des performances globales.

Conclusion L'analyse des simulations montre que la configuration correspondant à une densité de 600 kg.m^{-3} constitue le meilleur compromis. Lors du point culminant de l'impact avec une vague de 4 m.s^{-1} , le niveau de l'eau se situe sensiblement à mi-hauteur de

la coque, permettant une répartition équilibrée des contraintes hydrodynamiques. Cette densité offre ainsi un bon compromis entre stabilité, flottabilité et performances de navigation, ce qui en fait la solution la plus adaptée pour le projet Zéphyr.

Comparaison globale des trois configurations

Les trois simulations montrent que la densité des matériaux influence fortement la réponse dynamique verticale du Zéphyr. La configuration bleue semble être la plus défavorable du point de vue des oscillations, car elle présente les plus grandes amplitudes de déplacement et les vitesses verticales les plus brusques. La configuration verte semble offrir le comportement le plus stable, tandis que la configuration rouge constitue un compromis intermédiaire.

TABLE 4.1 – Comparaison qualitative des comportements dynamiques observés

Configuration	Amplitude verticale	Vitesse verticale	Interprétation
800	Élevée	Variations brusques	Comportement plus instable
400	Plus faible	Plus régulière	Meilleur amortissement apparent
600	Moyenne	Moyenne	Compromis intermédiaire

Influence de la masse sur la stabilité

La masse d'un bateau agit sur son inertie. Une masse plus importante tend à rendre le bateau moins sensible aux petites perturbations, mais peut aussi augmenter l'enfoncement et modifier la position du centre de gravité. Une masse plus faible facilite le déplacement et réduit la consommation énergétique, mais peut entraîner une réponse plus vive aux vagues.

Dans le cas du Zéphyr, il faut donc éviter deux situations extrêmes :

- une structure trop lourde, qui pénaliserait la vitesse, l'autonomie et l'enfoncement ;
- une structure trop légère, qui pourrait amplifier les oscillations et réduire la stabilité.

Le meilleur choix est donc un compromis. Les matériaux doivent être suffisamment légers pour préserver l'efficacité énergétique, mais suffisamment rigides et bien répartis pour

stabiliser le bateau.

5. Discussion et choix final des matériaux

Synthèse des résultats

Les différentes analyses réalisées montrent que les matériaux doivent être choisis selon plusieurs critères complémentaires. Une simple comparaison de résistance mécanique ne suffit pas. Il faut également prendre en compte la masse, la rigidité, la corrosion, la fabrication et le comportement dynamique. L'étude du safran montre que le composite carbone-époxy possède une résistance largement suffisante face aux efforts normaux considérés. Sa faible masse et sa grande rigidité en font un choix pertinent pour la pale du safran. L'aluminium reste adapté pour la mèche ou les pièces de liaison, car il offre une bonne résistance mécanique et une mise en œuvre plus simple. Les simulations dynamiques montrent quant à elles que les densités de matériaux modifient la réponse verticale du bateau. Une configuration trop défavorable peut produire des oscillations importantes du centre de masse. Le choix du matériau optimal doit donc limiter ces mouvements tout en conservant une masse raisonnable.

Choix recommandé par élément

Élément	Matériau recom-mandé	Justification
Safran	CFRP	Léger, rigide, très bonne résistance spécifique
Mèche de safran	Aluminium marin	Bonne résistance, usinage simple, transmission du couple
Bras de liaison	Aluminium ou composite renforcé	Besoin de rigidité et de résistance en flexion
Coque principale	Composite + structure interne	Bon compromis masse/résistance/flottabilité
Flotteurs	Polystyrène + composite	Flottabilité élevée et protection externe
Dérive	Composite ou strato-conception renforcée	Résistance hydrodynamique et forme contrôlée

6. Conclusion générale

Ce mémoire a permis d'étudier l'influence des matériaux sur le comportement du Zéphyr, un trimaran autonome destiné à la recherche océanographique. Le travail a été organisé autour de trois axes principaux : l'étude hydrodynamique du safran, l'analyse des matériaux et l'étude dynamique du centre de masse.

L'étude du safran a montré que les efforts hydrodynamiques dépendent fortement de la vitesse du bateau et de l'angle d'incidence. Les forces de portance et de traînée permettent de calculer une force résultante, puis un moment autour de l'axe de rotation du safran. Le moment maximal obtenu permet de dimensionner le système de commande.

L'étude des matériaux a montré que le composite carbone-époxy est particulièrement adapté aux pièces nécessitant une forte rigidité et une faible masse, comme le safran. L'aluminium reste pertinent pour les pièces métalliques et les éléments de liaison. Le choix final doit cependant tenir compte du coût, de la fabrication, de la corrosion et de la durabilité en milieu marin.

L'analyse de résistance a permis de vérifier que la contrainte normale appliquée au safran reste très inférieure à la contrainte admissible du matériau. Cette première validation montre que le matériau choisi possède une marge de sécurité importante pour l'effort considéré.

Enfin, les simulations dynamiques ont mis en évidence l'influence des densités de matériaux sur le mouvement vertical du centre de masse. Les courbes de coordonnée, de vitesse et de déplacement vertical montrent que certaines configurations produisent des oscillations plus importantes que d'autres. Le choix des matériaux ne doit donc pas se limiter à la résistance mécanique : il doit également prendre en compte la stabilité dynamique du bateau.

En conclusion, le meilleur choix de matériaux pour le Zéphyr repose sur un compromis entre légèreté, rigidité, résistance et stabilité. Cette étude constitue une première étape vers une optimisation plus complète du trimaran. Elle pourra être enrichie par des simulations plus précises, des essais expérimentaux et une étude détaillée de la répartition des

masses.

A. Annexes



FIGURE A.1 – ZÉPHYR

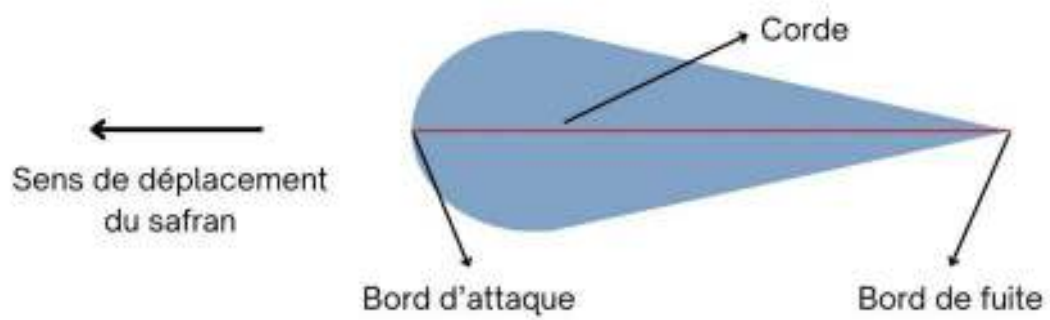


FIGURE A.2 – PROFIL NACA 0010

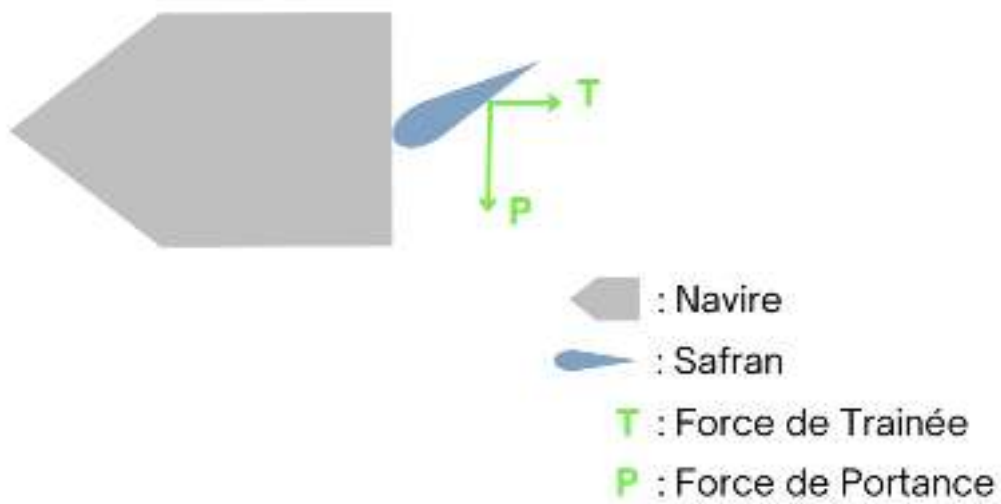


FIGURE A.3 – Forces appliquées au safran

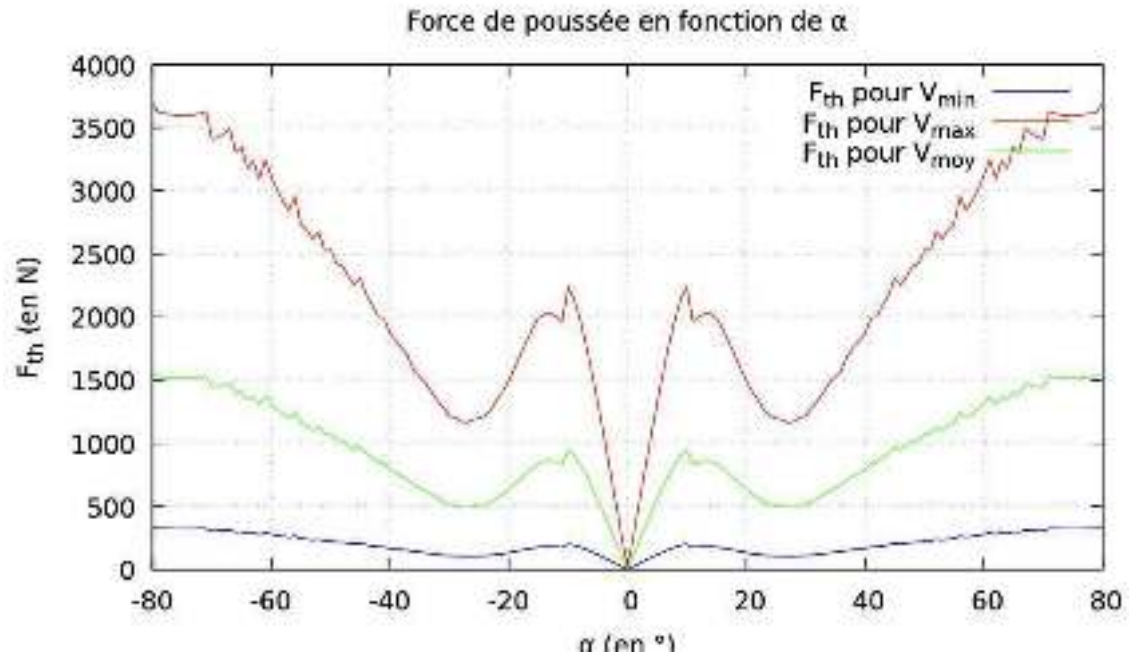


FIGURE A.4 – Évolution de la force de poussée en fonction de α pour trois vitesses

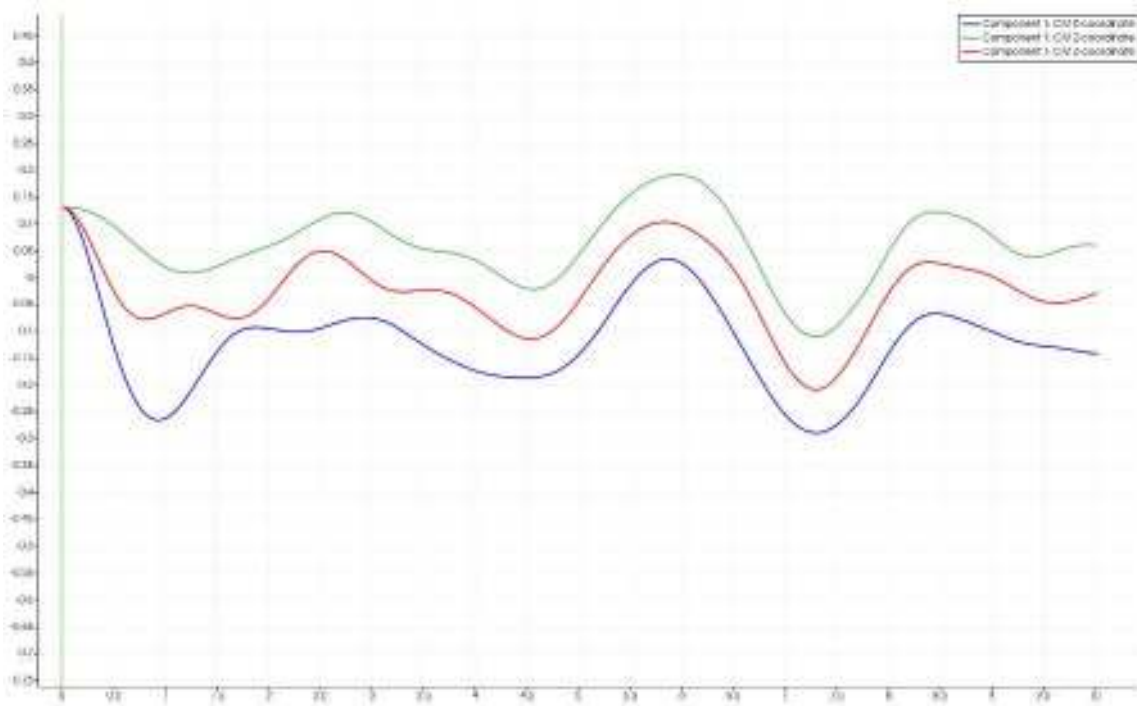


FIGURE A.5 – Évolution de la coordonnée verticale du centre de masse.

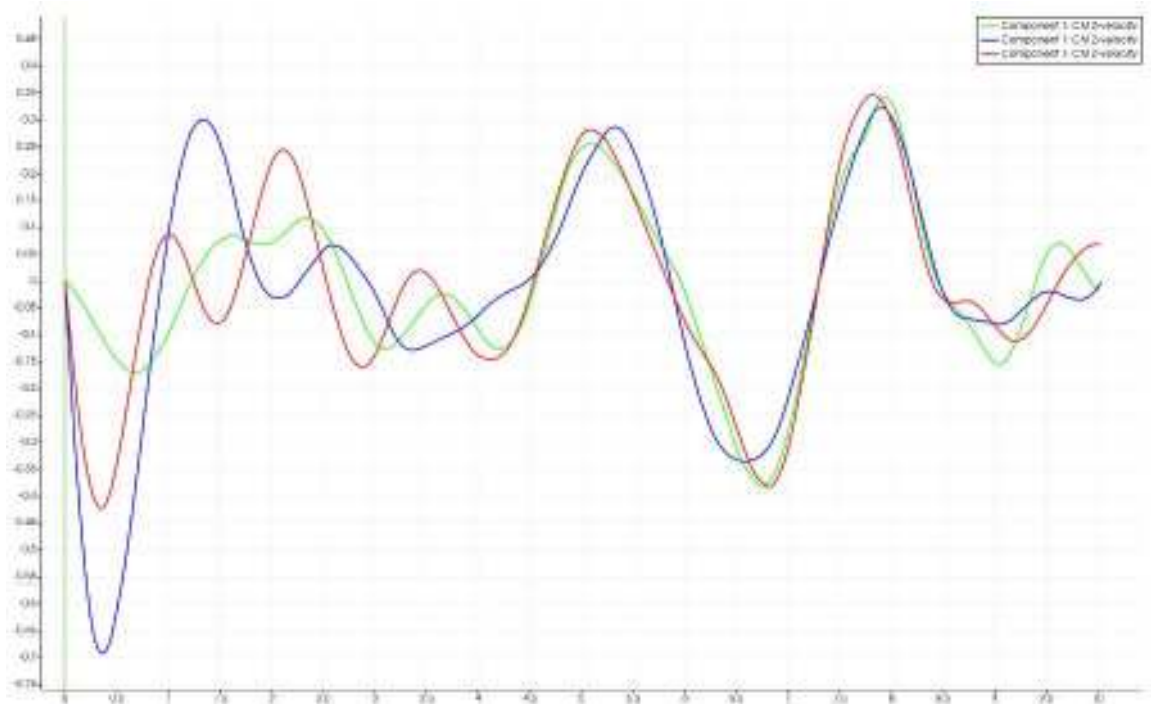


FIGURE A.6 – Évolution de la vitesse verticale du centre de masse.

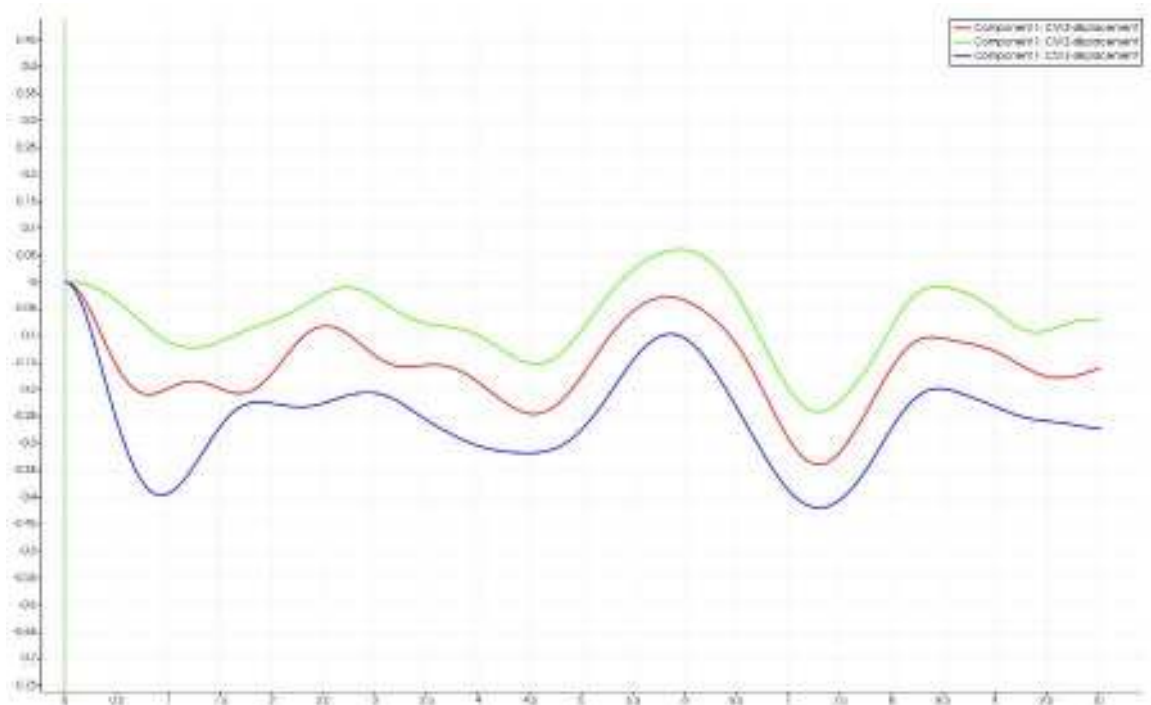


FIGURE A.7 – Évolution du déplacement vertical du centre de masse.

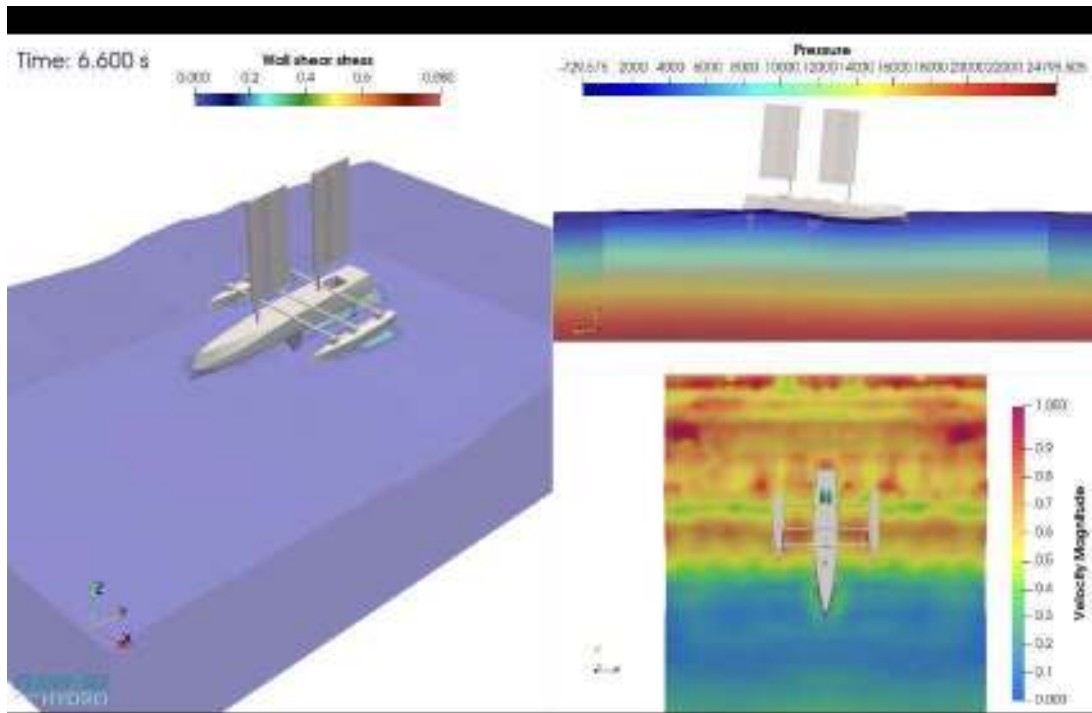


FIGURE A.8 – Simulation pour une densité de 400 kg.m^{-3} .

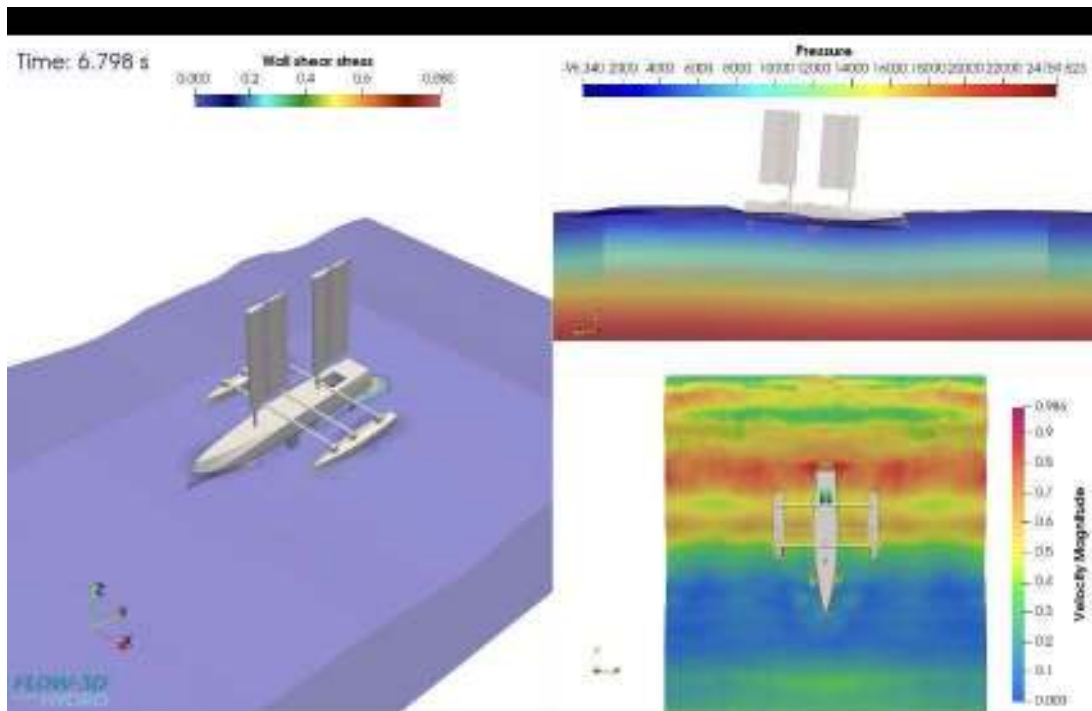


FIGURE A.9 – Simulation pour une densité de 600 kg.m^{-3} .

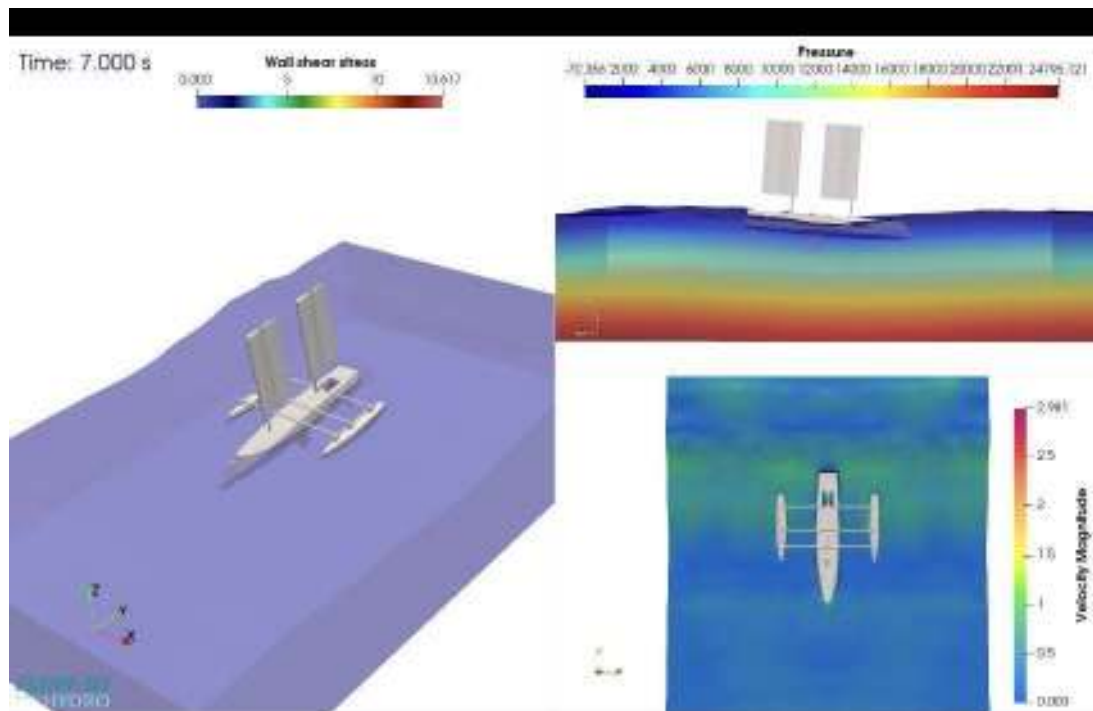


FIGURE A.10 – Simulation pour une densité de 800 kg.m^{-3} .

Bibliographie

- [1] Association HydroSharks, *Documentation technique du projet Zéphyr*, Documents internes transmis dans le cadre du Projet Personnel de Recherche, 2025.
- [2] M. F. Ashby and D. R. H. Jones, *Engineering Materials 1 : An Introduction to Properties, Applications and Design*, 5th Edition, Elsevier, 2018.
- [3] Safran Disponible sur : https://www.culture-maritime.com/fr/page-he3_cours.xhtml
- [4] M. F. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Design*, Butterworth-Heinemann, 5th edition, 2016.
- [5] MatWeb, *Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composite Material Properties*, consulté en mai 2026, Disponible sur : <https://www.matweb.com>
- [6] MatWeb, *Aluminum 6061-T6 ; 6061-T651*, consulté en mai 2026, Disponible sur : <https://www.matweb.com>
- [7] FLOW3D, <https://www.flow3d.com/products/flow-3d-hydro/>