

ÉTUDE DES MATÉRIAUX & DENSITÉ DU ZÉPHYR

Mathias MAYAN · L2 Mathématiques Renforcée · M. ERSOY ·
2025-2026



Partenariat avec HydroSharks :



PLAN DE LA PRÉSENTATION:

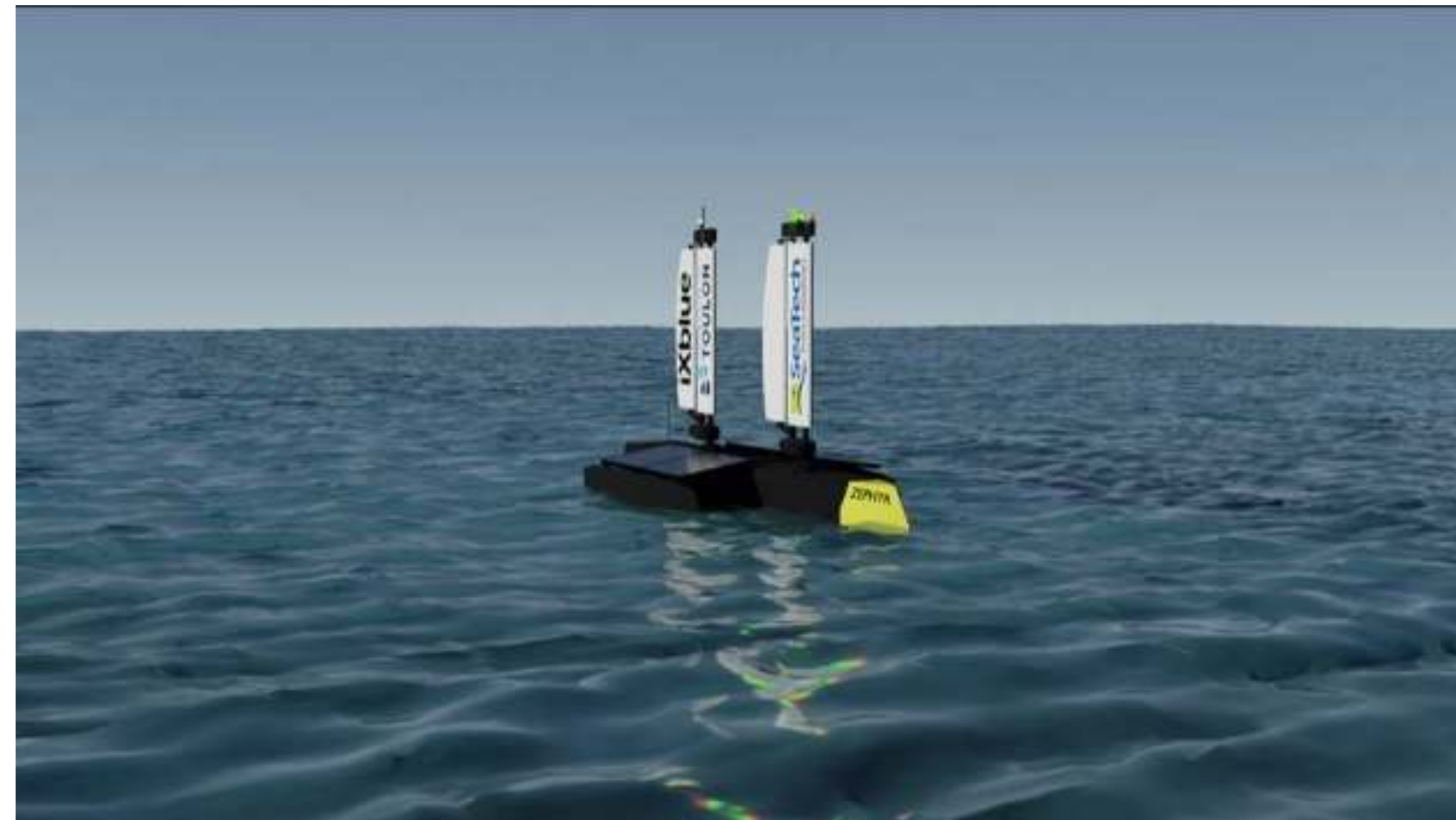
- Présentation générale du Zéphyr
- Étude hydrodynamique du safran
- Étude et comparaison des matériaux
- Étude dynamique et influence des densités de matériaux
- Conclusion

Mathias MAYAN · L2 Mathématiques Renforcée · M. ERSOY ·
2025-2026





- Destiné à réaliser des missions de recherche océanographique.
- Capable de naviguer plusieurs jours, voire plusieurs semaines, sans intervention humaine.
- Propulsé par des voiles rigides utilisant l'énergie du vent.
- Alimenté par des panneaux solaires pour assurer son autonomie énergétique.
- Permet de collecter des données environnementales et météorologiques en mer.
- Conçu pour limiter la consommation d'énergie et l'impact environnemental des missions.



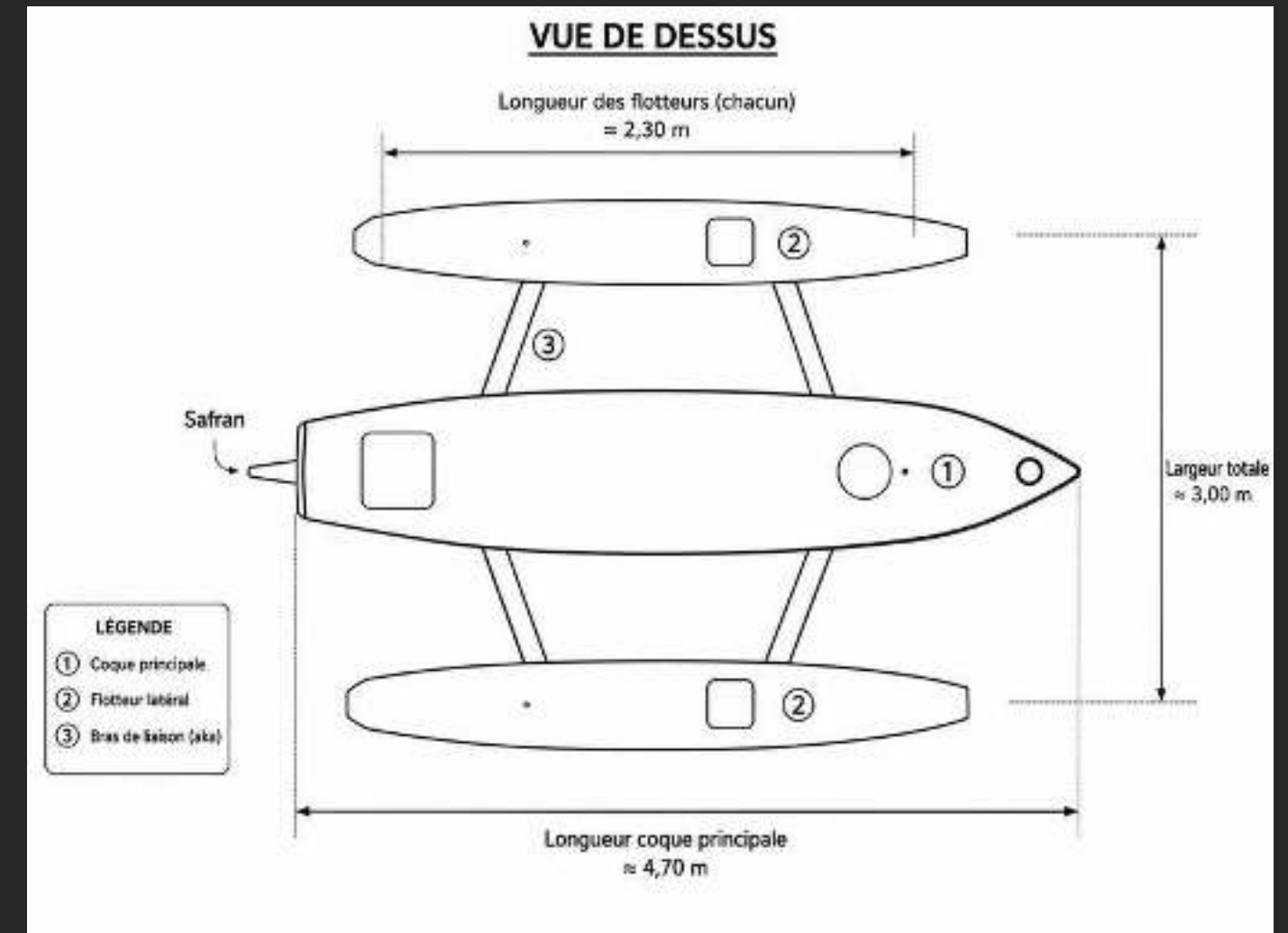
PRÉSENTATION DU TRIMARAN ZÉPHYR

CARACTÉRISTIQUES DU ZÉPHYR:

UNIVERSITÉ DE TOULON

Caractéristiques générales

- Type de bateau : Trimaran autonome
- Longueur de la coque principale : $\approx 4,70$ m
- Longueur des flotteurs latéraux : $\approx 2,30$ m chacun
- Largeur totale : $\approx 3,00$ m
- Hauteur des voiles rigides : $\approx 2,00$ m
- Nombre de voiles : 2 voiles rigides
- Nombre de flotteurs : 2 flotteurs latéraux
- Énergie embarquée : panneaux solaires intégrés au pont
- Surface du safran : $S = 0,172 \text{ m}^2$
- Architecture : coque centrale reliée aux flotteurs par deux bras de liaison

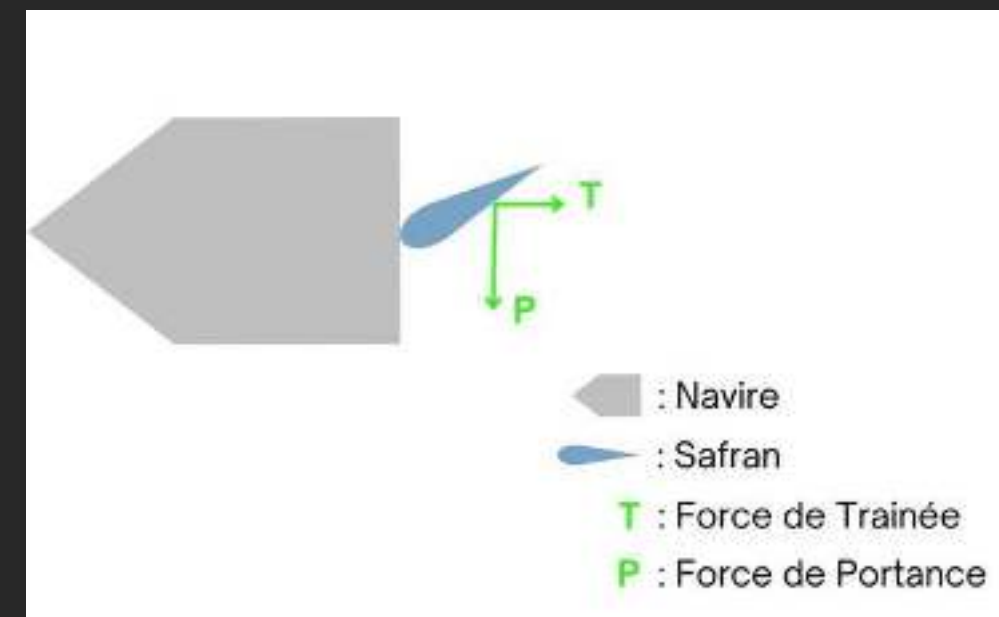


ÉTUDE HYDRODYNAMIQUE DU SAFRAN

Profil :

- Profil NACA 0010 choisi pour sa symétrie
- Fonctionnement identique bâbord / tribord (idéal pour la direction)
- Épaisseur de 10 % de la corde : bon compromis rigidité / traînée
- Bonne portance à faibles angles d'incidence
- Réduction des pertes hydrodynamiques
- Amélioration de la manœuvrabilité sans dégrader les performances globales

Forces :



Portance :

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

Traînée :

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

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 :

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

APPLICATION NUMÉRIQUE DANS LE CADRE DU CFRP ET DE L'ALUMINIUM

ROLE DE L'APPLICATION :

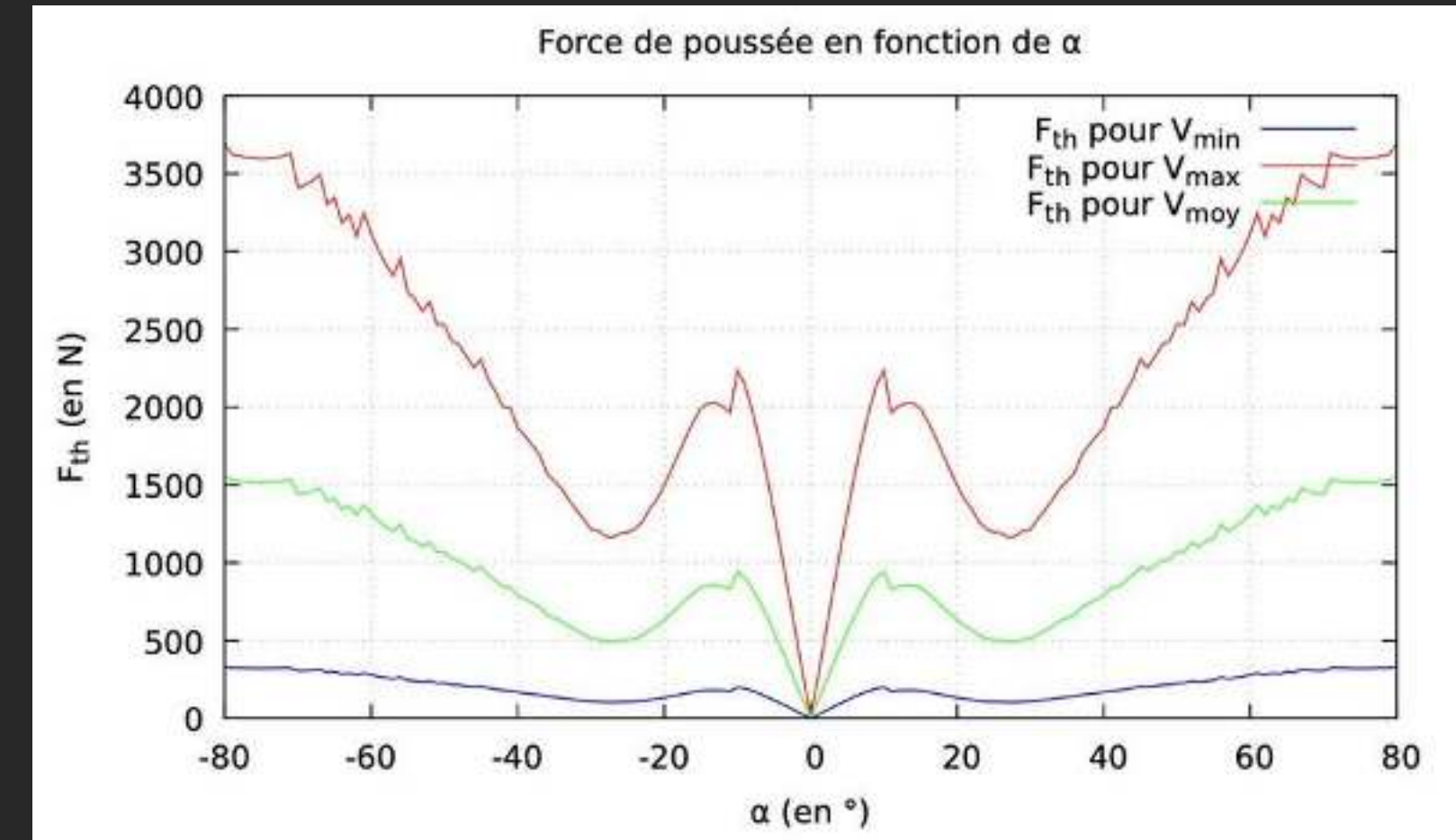
- Vérifier la résistance du safran face aux efforts exercés lors du mouvement du Zéphyr. Celui-ci est composé d'un corps en composite fibre de carbone-époxy (CFRP) et d'un bras en aluminium (Al).

CONDITIONS DE L'APPLICATION :

- Angle de $\pm 10^\circ$ pour maximiser son efficacité et minimiser sa traînée

Données utilisées :

- Surface du safran : $S = 0,172 \text{ m}^2$
- Masse volumique de l'eau : $\rho = 1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
- Limite élasticité CFRP : 1260MPa
- $V_{\min} : 1,54 \text{ m s}^{-1}$
- $V_{\max} : 5,14 \text{ m s}^{-1}$
- $V_{\text{moy}} : 3,34 \text{ m s}^{-1}$
- Valeur retenue pour rester cohérent avec les documents HydroSharks :
 - Force de poussée maximale ($\pm 10^\circ$) : $F_{\text{th,max}} = 2235 \text{ N}$
 - Distance axe / point d'application : $d = 12,293 \text{ mm} = 0,012293 \text{ m}$



RÉSULTAT APPLICATION NUMÉRIQUE

CONTRAİNTE PRATIQUE ADMISSIBLE:

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

CONTRAİNTE NORMAL MAXIMALE :

$$\sigma_{\max} = \frac{F_{th,\max}}{S} = \frac{2235}{0.172} = 12997 \text{ Pa} = 0.013 \text{ MPa}$$

On compare alors la contrainte maximale à la contrainte admissible :

$$\sigma_{\max} < R_{pe} \quad \text{car} \quad 0.013 < 630$$

La condition de résistance est donc largement vérifiée.

RECOMMANDATIONS MATÉRIAUX ADAPTÉES A L'ENSEMBLE DES ZONES DU ZEPHYR



SAFRAN	CFRP	Léger, rigide, très bonne résistance
MÈCHE DE SAFRAN	Aluminium marin	Bonne résistance, usinage simple, transmission du couple
BRAS DE LIAISON	Aluminium + composite renforcée	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	Résistance hydrodynamique

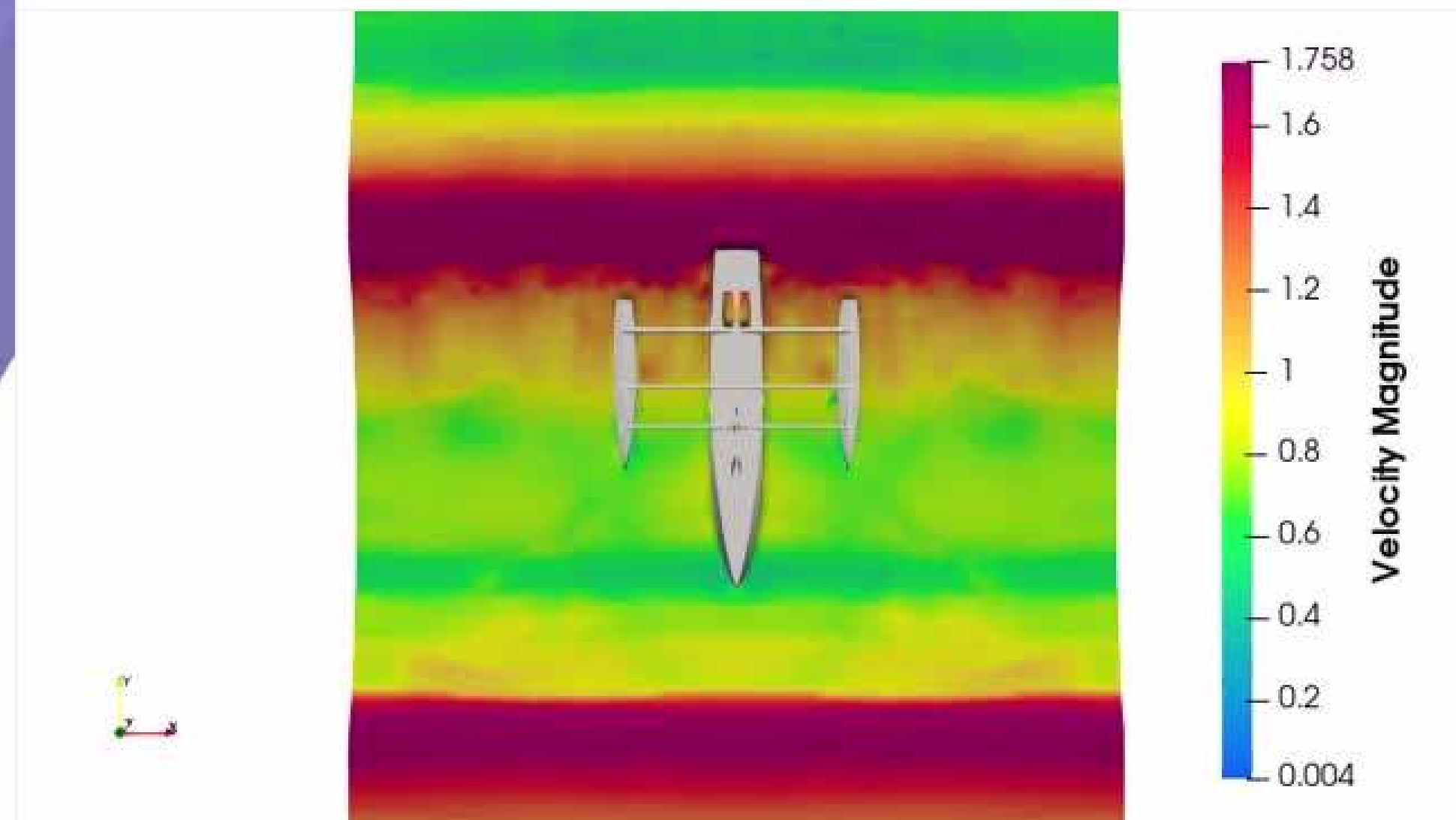
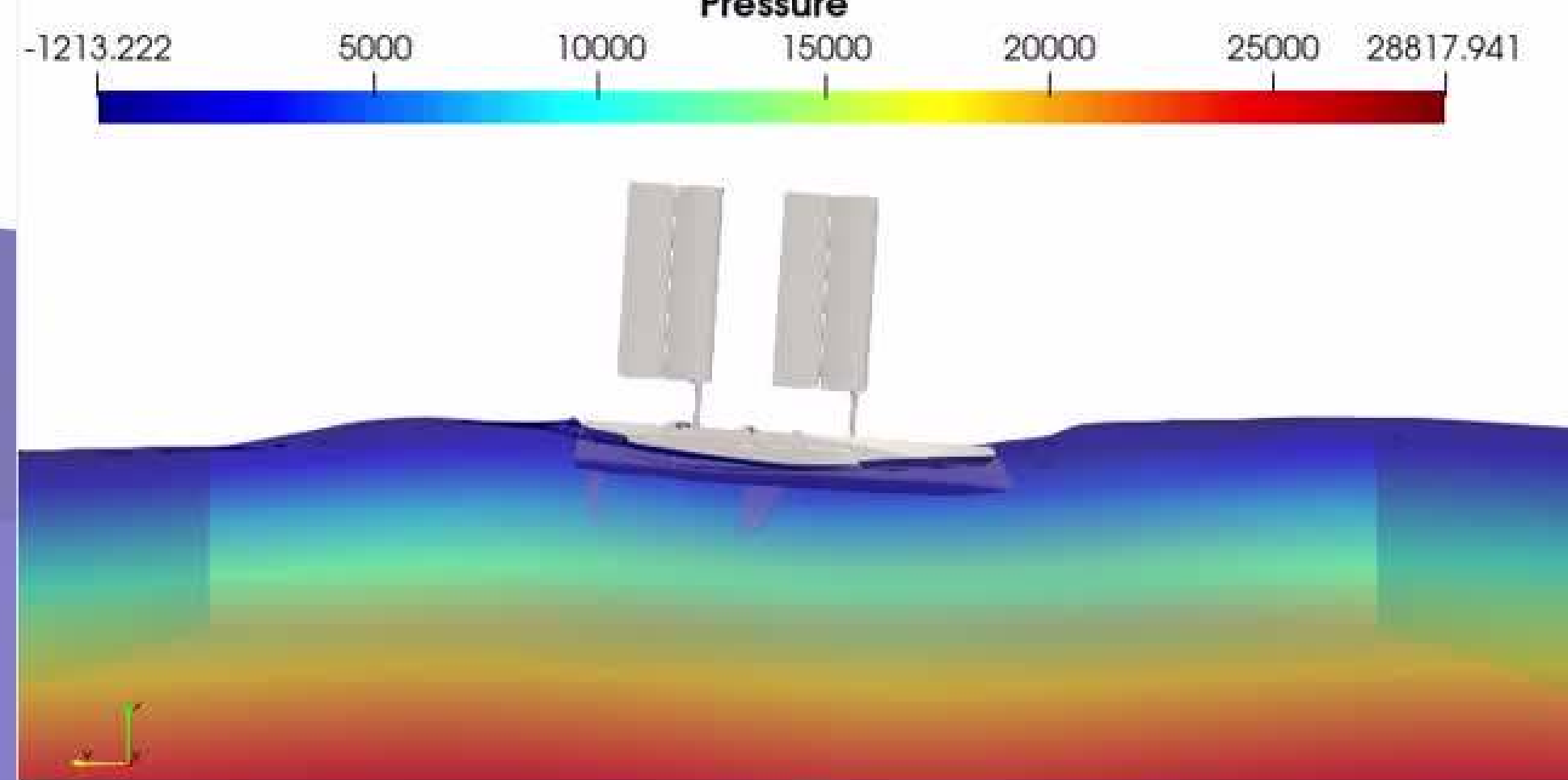
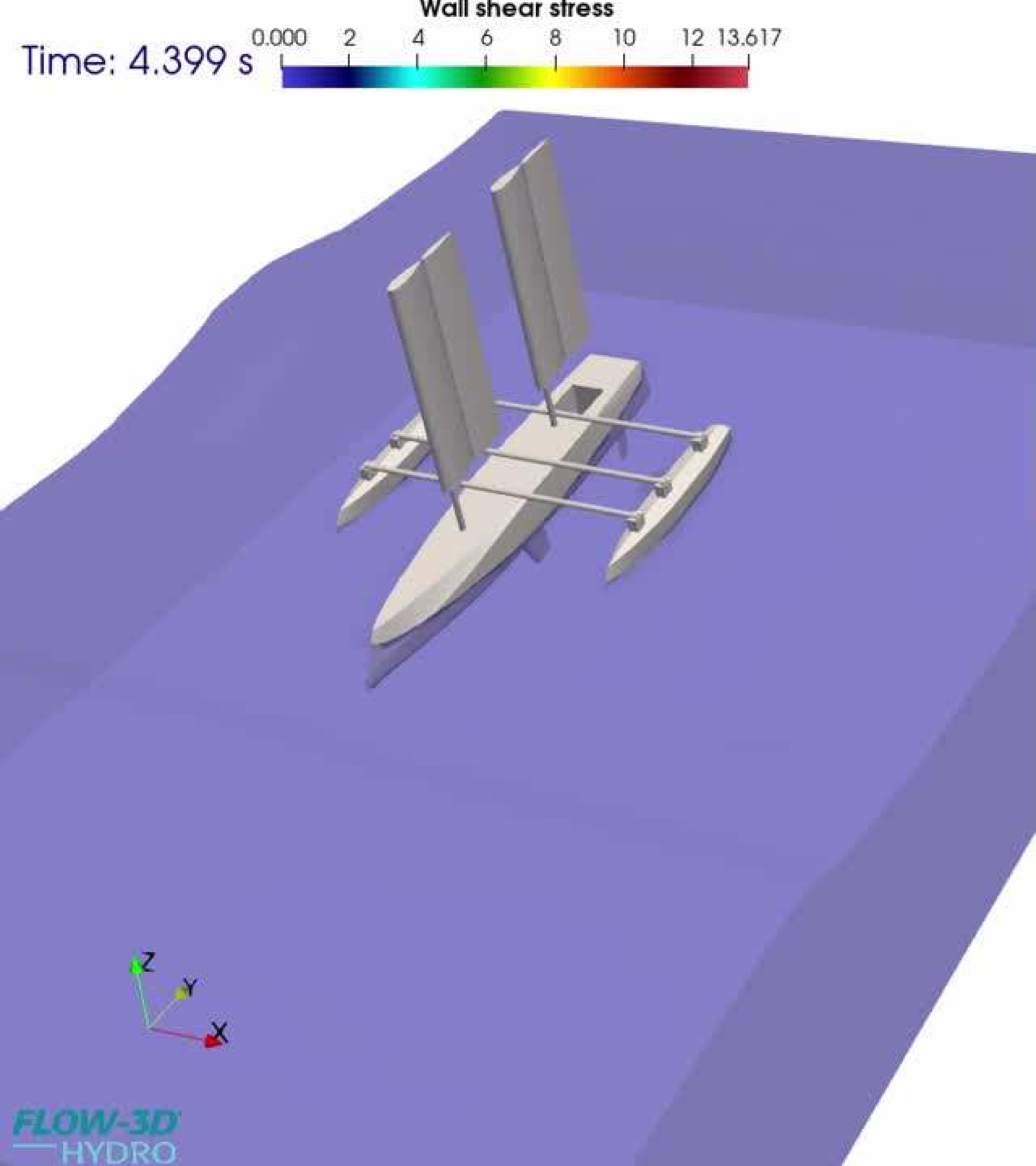
CONFIGURATIONS DE DENSITÉ TESTÉES

- Simulations réalisées sur Flow-3D
- Découverte et prise en main du logiciel grâce à l'intervention de M. Julien Nugue (ancien étudiant de SeaTech)
- Dans le cadre de ces simulations, une densité uniforme a été attribuée à l'ensemble du Zephyr. Trois cas ont été étudiés : $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$, 600 kg/m^3 et 800 kg/m^3

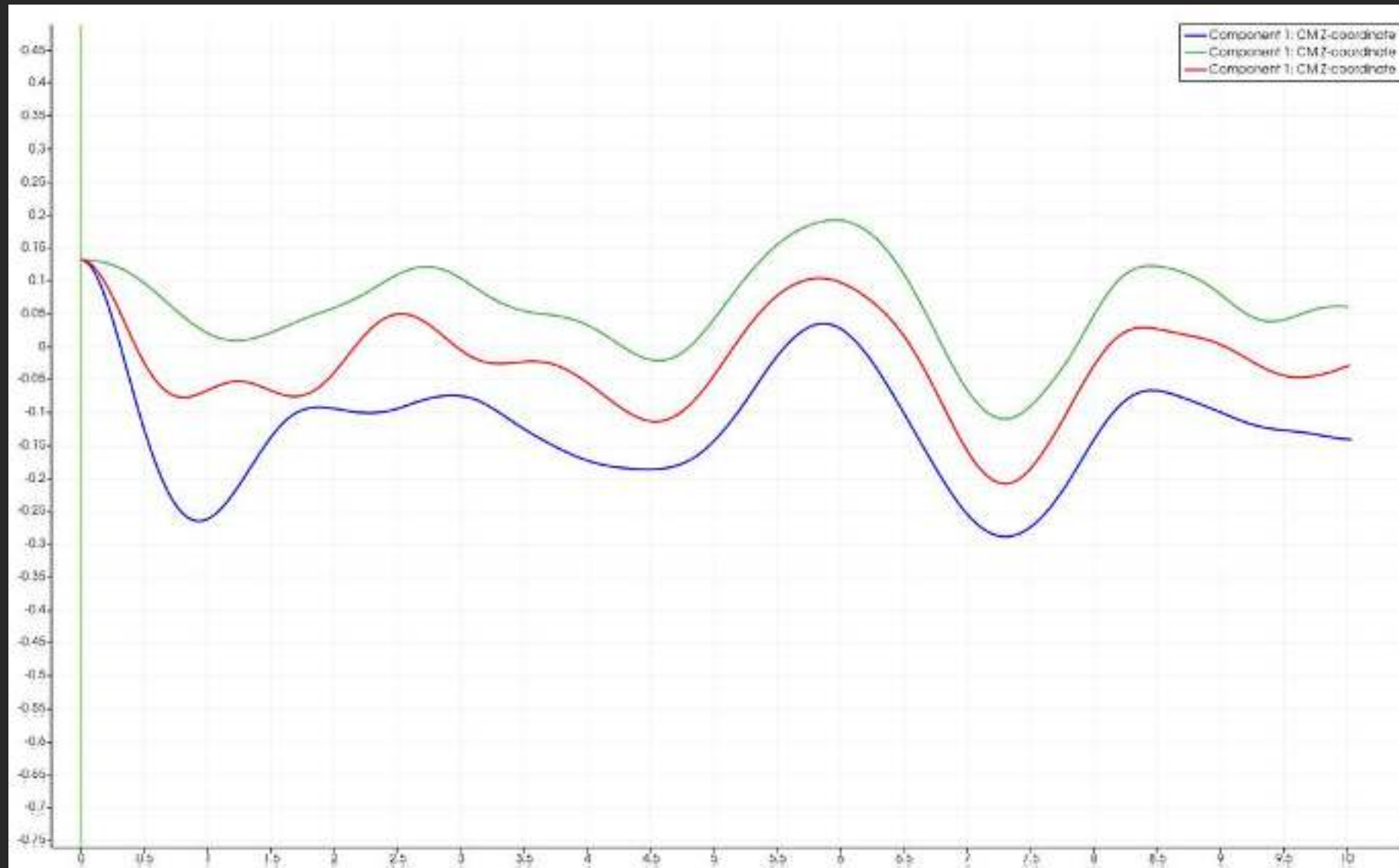
● **Configuration Bleue** — 800 kg/m^3 : équivalent = bois + époxy (contreplaqué marine). Densité élevée, enfoncement important dans l'eau, traînée accrue et efforts sur la coque augmentés. Stabilité dynamique réduite avec amplitudes verticales négatives importantes.

● **Configuration Rouge** — 600 kg/m^3 : équivalent = sandwich fibre de verre (GFRP) + mousse PVC. Densité intermédiaire, meilleur compromis entre flottabilité et stabilité. Niveau d'eau à mi-hauteur de coque, efforts équilibrés et comportement dynamique régulier.

● **Configuration Verte** — 400 kg/m^3 : équivalent = sandwich carbone (CFRP) + mousse PVC. Densité faible, forte flottabilité, coque haute sur l'eau. Mouvements verticaux accrus mais maintien de position plus haute et traînée réduite.



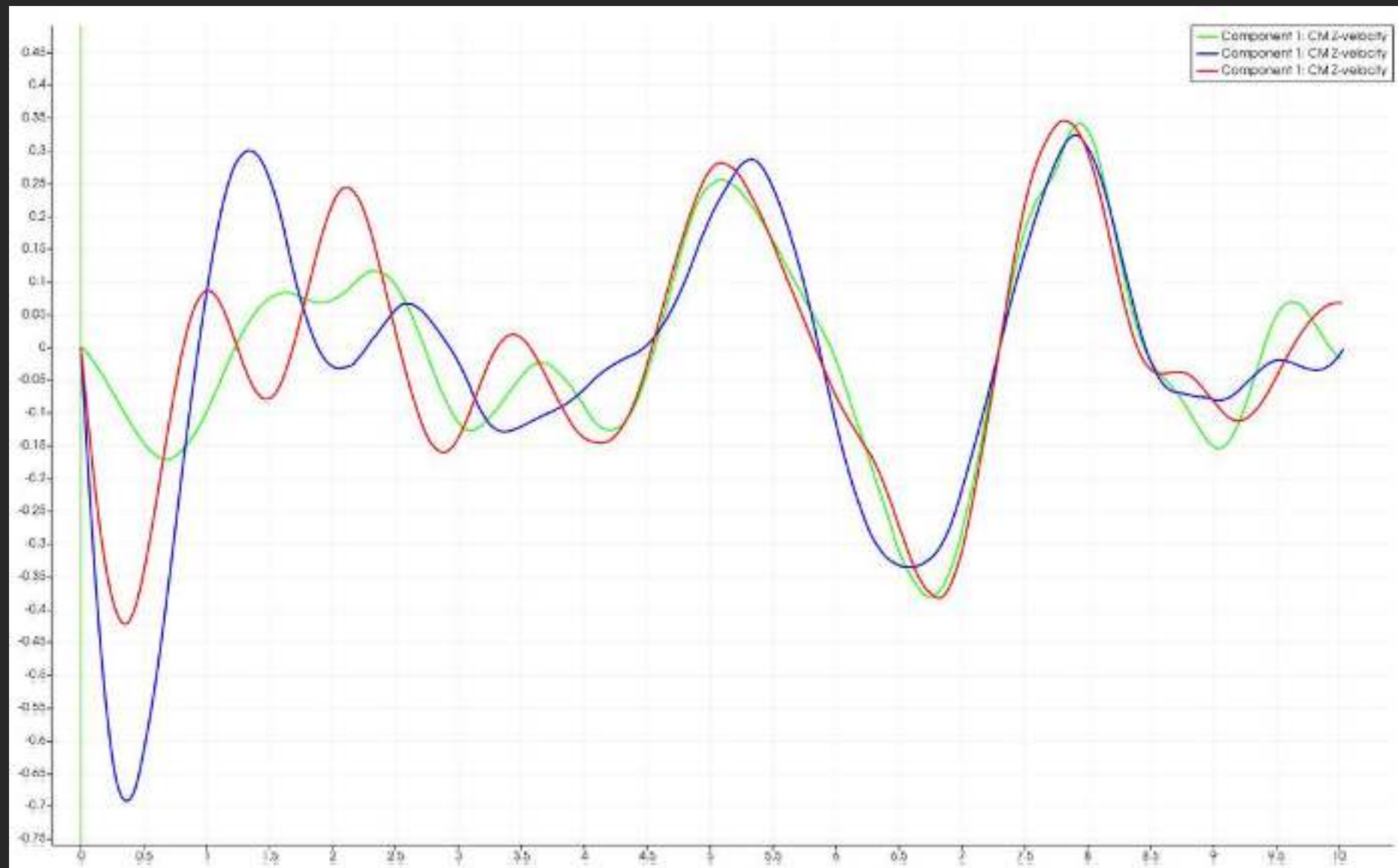
RÉSULTATS SIMULATION – COORDONNÉES VERTICALES Z



Amplitudes verticales par configuration

- Config. Bleue (800 kg/m³) : amplitudes négatives importantes, enfoncement prononcé
- Config. Rouge (600 kg/m³) : compromis intermédiaire, oscillations modérées
- Config. Verte (400 kg/m³) : maintien de position plus haute, flottabilité accrue

RÉSULTATS SIMULATION – VITESSE VERTICAL



Configuration Bleue et Verte

Bleu (800 kg/m^3) : variations brusques atteignant $-0,7 \text{ m/s}$, traduisant des chocs hydrodynamiques marqués. Déplacement vertical élevé ($-0,4 \text{ m}$), signe d'un enfoncement important dans la houle. La densité élevée génère une inertie accrue, réduisant la réactivité du bateau et augmentant les efforts sur la coque.

Verte (400 kg/m^3) : oscillations plus douces, position haute maintenue, mais sensibilité accrue aux perturbations de surface. Les deux configurations offrent une meilleure stabilité dynamique que la bleue.

Configurations Rouge

Rouge (600 kg/m^3) : variations de vitesse verticale modérées et régulières, déplacement contenu — compromis optimal entre stabilité et flottabilité.

SIMULATION FLOW-3D IMPACT

VAGUE 4 M/S

Densité 400 kg/m³:

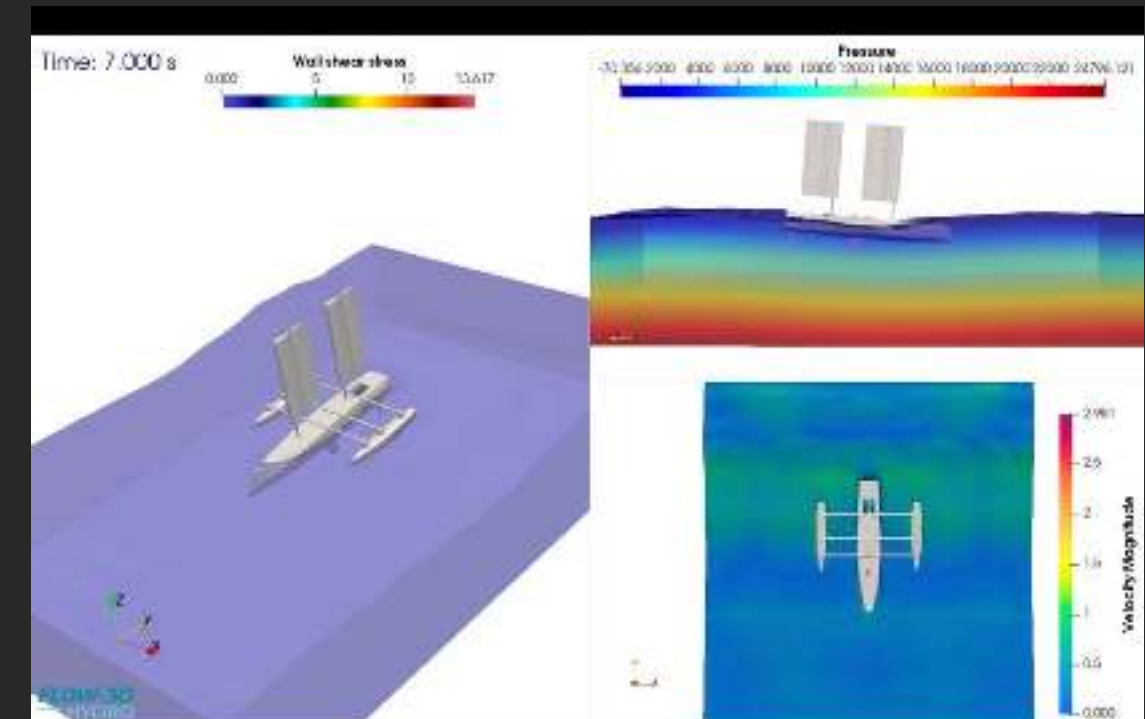
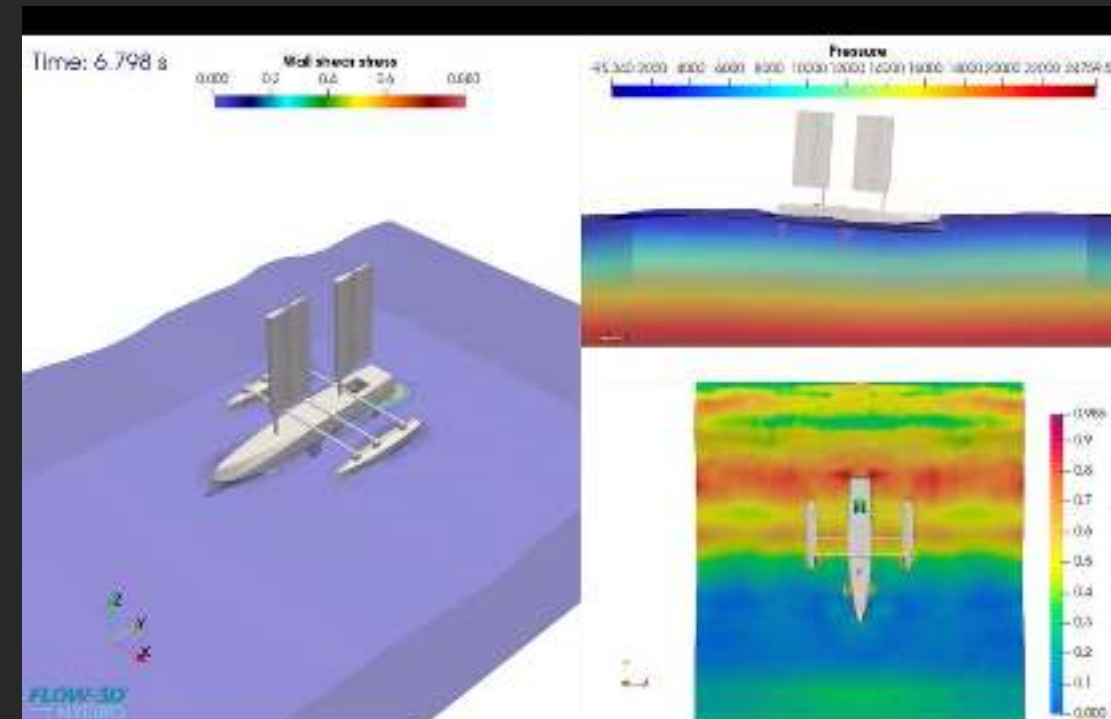
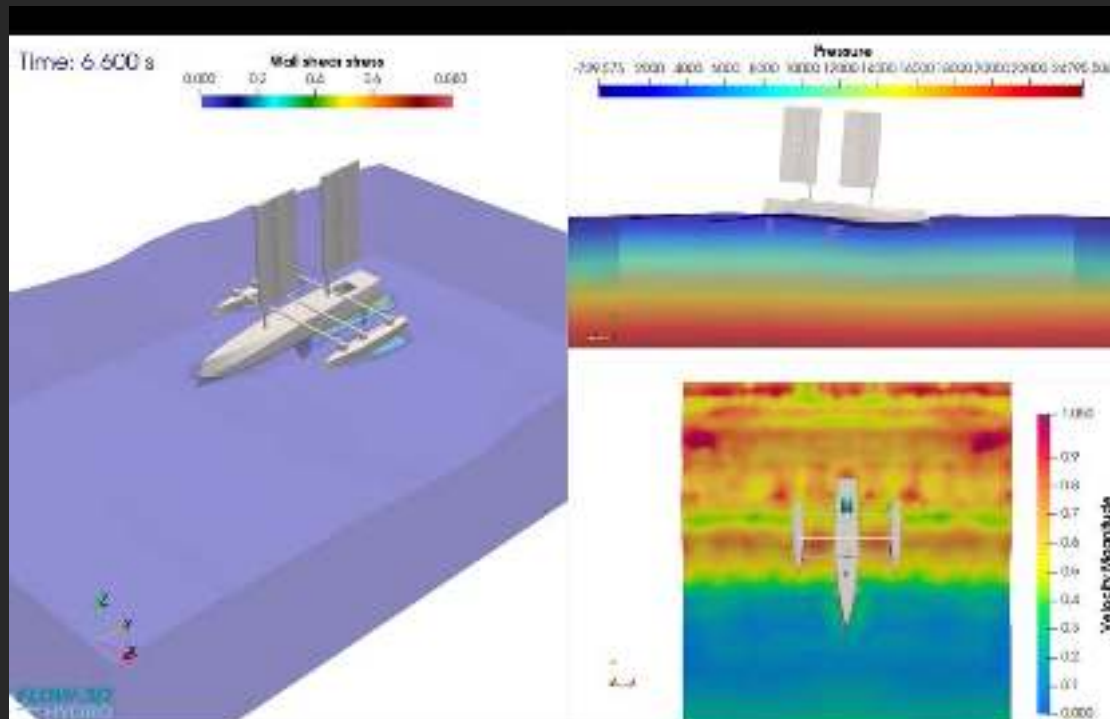
Densité 400 : forte flottabilité,
coque haute
Mouvements verticaux accrus,
instabilité

Densité 600 kg/m³:

Densité 600 : meilleur compromis
global
Niveau eau à mi-hauteur, efforts
équilibrés

Densité 800 kg/m³:

Enfoncement important de la coque
Efforts hydrodynamiques augmentés
Traînée accrue, stabilité réduite



SYNTHÈSE DES PERFORMANCES DYNAMIQUES



- Densité 400 kg/m³ : forte flottabilité mais mouvements verticaux accrus, traînée augmentée.
Densité 800 kg/m³ : enfoncement important, efforts sur coque élevés, stabilité réduite.
Densité 600 kg/m³ : niveau d'eau à mi-hauteur, efforts équilibrés, traînée maîtrisée.
- Densité 600 kg/m³ recommandée : meilleur équilibre stabilité, flottabilité et performances globales.

CONCLUSION GÉNÉRALE



Densité optimale confirmée à 600 kg/m^3 : meilleur équilibre entre stabilité dynamique, flottabilité et performances hydrodynamiques. Le CFRP s'impose comme matériau de référence pour le safran et les éléments structurels clés. Une approche composite majoritaire est recommandée pour l'ensemble de la structure, avec l'aluminium marin réservé à certaines liaisons. La répartition rigoureuse des masses demeure un facteur déterminant pour la stabilité dynamique du trimaran Zéphyr en conditions réelles de mission océanographique.



MERCI

REMERCIEMENTS À M. ERSOY (IMATH), À
L'ASSOCIATION HYDROSHARKS,
À M. NUGUE
ET À L'UNIVERSITÉ DE TOULON
MATHIAS MAYAN - L2 MATHÉMATIQUES
RENFORCÉE - UNIVERSITÉ DE TOULON



EQUATIONS ET MÉTHODE NUMÉRIQUE DE FLOW 3D

Méthodes derrière FLOW-3D

- Résolution des équations de Navier–Stokes
- Conservation de la masse, quantité de mouvement (et énergie selon cas)
- Utilisation de la méthode des volumes finis (FVM)
- Maillage cartésien structuré (grille rectangulaire)

Equations derrière FLOW-3D

Continuity: $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$

X-Momentum: $\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (u\mathbf{u}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \nabla^2 u$

Y-Momentum: $\frac{\partial v}{\partial t} + \nabla \cdot (v\mathbf{u}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \nabla^2 v$

Z-Momentum: $\frac{\partial w}{\partial t} + \nabla \cdot (w\mathbf{u}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \nabla^2 w$

DÉVELOPPEMENT RÉSULTAT APPLICATION

NUMÉRIQUE

Pour un angle de débattement de $\pm 10^\circ$, la force de poussée maximale relevée sur un graphique fourni par HydroSharks est :

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

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

$$d = 12.293 mm = 0.012293 m$$

Le moment maximal vaut donc :

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

$$M_{max} = 2235 \times 0.012293 = 27.474855 N.m$$

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.

CONTRAINTE PRATIQUE ADMISSIBLE:

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

CONTRAINTE NORMAL MAXIMALE :

$$\sigma_{max} = \frac{F_{th,max}}{S} = \frac{2235}{0.172} = 12997 \text{ Pa} = 0.013 \text{ MPa}$$

On compare alors la contrainte maximale à la contrainte admissible :

$$\sigma_{max} < R_{pe} \quad \text{car} \quad 0.013 < 630$$