

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



Département Génie Mécanique

Laboratory of Green and Mechanical Development-LGMD

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en mécanique

Étude et Conception d'un drone aquatique de sauvetage en mer et
réalisation de la coque

Benlounes Yanis & Bouaoud Mohamed Hilal

Sous la direction de **Dr. Zeroudi Nasreddine ENP**

Dr.Kechida Ahmed CRTI

Présenté et soutenu publiquement le (25/06/2025)

Composition du jury : Président : Dr. Boubekour Mohamed ENP
 Examineur : Dr.Amoura Naserddine ENP

ENP 2025

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



Département Génie Mécanique

Laboratory of Green and Mechanical Development-LGMD

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en mécanique

Étude et Conception d'un drone aquatique de sauvetage en mer et
réalisation de la coque

Benlounes Yanis & Bouaoud Mohamed Hilal

Sous la direction de **Dr. Zeroudi Nasreddine** ENP

Dr.Kechida Ahmed CRTI

Présenté et soutenu publiquement le (25/06/2025)

Composition du jury : Président : Dr. Boubekeur Mohamed ENP
 Examineur : Dr.Amoura Naserddine ENP

ENP 2025

ملخص

يركز هذا المشروع النهائي على تصميم وتطوير مركبة مائية بدون طيار مخصصة لمهام الإنقاذ البحري. استجابةً للتحديات التي يفرضها الوسط البحري من عدم استقرار، والمسافات البعيدة، ومتطلبات التدخل السريع في حالات الطوارئ، يهدف المشروع إلى تقديم حل متين ومستقل ومُحسن للتدخل في الظروف الحرجة. يتبنى المشروع نهجًا متعدد التخصصات، يجمع بين النمذجة ثلاثية الأبعاد واختيار المواد المركبة وتوصيفها، والتحقق من الهيكل باستخدام تحليل العناصر المحدودة (برنامج ANSYS) وتقييم الأداء الهيدروديناميكي من خلال محاكاة ديناميكيات الموانع الحسابية متعددة الأطوار (طريقة VOF) لدراسة قوى السحب والرفع. أجريت اختبارات ميكانيكية مسبقة لتحديد خصائص المواد المركبة المقواة بالألياف الزجاج تحت تأثير قوى الشد والانحناء. أكدت النتائج التي تم الحصول عليها ملاءمة الاختيارات الهيكلية والهيدروديناميكية، بما يضمن قابلية الطفو والمقاومة الميكانيكية وأداء الملاحه للمركبة المائية. ويضع النموذج الأولي المُنجز الأساس لتحسينات مستقبلية واستخدام عملي في البيئة البحرية.

الكلمات المفتاحية : مركبة مائية بدون طيار، الإنقاذ البحري، المواد المركبة، الألياف الزجاجية، ديناميكيات الموانع الحسابية، الهيدروديناميكا، الهيكل الساندويتش، بدن بحري.

Abstract

This final-year project focuses on the design and development of an aquatic drone dedicated to maritime rescue missions. In response to the challenges posed by the marine environment instability, distance, and urgent response requirements the aim is to deliver a robust, autonomous, and optimized solution for emergency intervention.

The project adopts a multidisciplinary approach combining 3D modeling, selection and characterization of composite materials, structural validation using finite element analysis (ANSYS), and hydrodynamic evaluation through multiphase CFD simulations (VOF method) to assess drag and lift forces. Prior mechanical tests were conducted to determine the properties of fiberglass-reinforced composites under tensile and bending loads.

The results confirm the relevance of the structural and hydrodynamic design choices, ensuring the drone's buoyancy, mechanical resistance, and navigation performance. The resulting prototype lays the groundwork for further improvements and real-world deployment.

Keywords : Aquatic drone, Maritime rescue, Composite materials, Fiberglass, CFD, Hydrodynamics, Sandwich structure, Naval hull.

Résumé

Ce travail de fin d'études porte sur la conception et la réalisation d'un drone aquatique destiné aux missions de sauvetage en mer. Face aux contraintes spécifiques de l'environnement marin instabilité des conditions, éloignement, réactivité nécessaire l'objectif est de proposer une solution autonome, robuste et optimisée pour intervenir rapidement en cas d'urgence.

Le projet repose sur une approche pluridisciplinaire intégrant la modélisation 3D, la sélection et la caractérisation de matériaux composites, la validation structurelle par la méthode des éléments finis (ANSYS), ainsi que l'analyse hydrodynamique via des simulations numériques multiphasiques (VOF) pour évaluer les forces de traînée et de portance. Une campagne expérimentale a été menée au préalable pour déterminer les propriétés mécaniques des composites à base de fibre de verre, en traction et en

flexion.

Les résultats obtenus ont permis de valider les choix structurels et hydrodynamiques du drone, en garantissant à la fois sa flottabilité, sa résistance mécanique, et ses performances en navigation. Le prototype ainsi développé constitue une base fiable pour d'éventuelles améliorations futures et une mise en œuvre en conditions réelles.

Mots clés : Drone aquatique, Sauvetage en mer, Matériaux composites, Fibre de verre, Simulation numérique, CFD, Hydrodynamique, Structure sandwich, Coque navale.

Remerciements

Qu'il nous soit permis avant tout d'exprimer notre profonde gratitude à ALLAH, le Tout-Puissant, pour nous avoir accordé la force et la patience nécessaires à la Réalisation de ce Mémoire. C'est grâce à sa guidance et à Sa bienveillance que nous avons pu mener à bien ce Travail.

Nous tenons également à exprimer notre gratitude à **Dr. Zeroudi Nasreddine** et à **Dr. Kechida Ahmed**, nos encadrants, pour leurs conseils avisés, leur patience et leur disponibilité tout au long de l'élaboration de ce Mémoire. Leur confiance en ce projet, leurs encouragements constants, ainsi que leurs remarques constructives et leur expertise nous ont permis de mener à bien ce travail et d'améliorer considérablement la qualité de notre Mémoire.

Nous remercions chaleureusement les membres du jury, **Dr. Boubekour Mohamed**, ainsi que **Dr. Amoura Naserddine**, pour avoir Accepté de porter leur regard critique sur ce Mémoire. Leur évaluation rigoureuse et constructive est essentielle pour notre apprentissage et notre développement.

Nous tenons à adresser nos sincères remerciements à l'ensemble des enseignants du Département Génie Mécanique de l'école national polytechnique pour leur implication constante dans la formation des étudiants et leur contribution précieuse à nos apprentissages. Leurs compétences pédagogiques et leur passion ont été une source d'inspiration et de motivation tout au long de notre cursus.

Une pensée particulière est adressée aux étudiants que nous avons côtoyés (Adem, Amine, El-mondhir, Fouad, Ismail, Riyad et Samy) quotidiennement durant nos années d'étude au Département qui nous ont apporté leur support moral et intellectuel tout au long de notre Mémoire.

Nous tenons à remercier chaleureusement tous ceux qui ont contribué, d'une manière ou d'une autre, à la réalisation de ce Mémoire. Plus particulièrement nos familles, votre soutien et vos encouragements ont et d'une grande importance pour nous. Nous sommes reconnaissants pour l'intérêt que vous avez porté à notre travail et pour les précieux conseils que vous nous avez prodigués.

Benlounes Yanis et Bouaoud Mohamed Hilal

Table des matières

Liste des tableaux

Table des figures

Liste des acronymes

Liste des symboles

Introduction générale	17
1 État de l’art sur les drones aquatiques de sauvetage	19
1.1 Introduction	19
1.2 Typologie des drones de sauvetage aquatique	19
1.2.1 USV – véhicule de surface non habité (Unmanned Surface Vehicles)	19
1.2.2 ROV –Véhicule sous-marin téléguidé (Remotely Operated Vehicles)	19
1.2.3 AUV – Véhicule sous-marin autonome (Autonomous Underwater Vehicles)	20
1.3 Études de cas de drones aquatiques de sauvetage	20
1.4 Normes, certifications et cadre réglementaire des drones aquatiques de sauvetage . . .	22
1.4.1 Cadre normatif international et européen	22
1.4.2 Sécurité fonctionnelle et cybersécurité	22
1.4.3 Normes de conception mécanique et environnementale	23
1.4.4 Reconnaissance opérationnelle et normalisation émergente	23
1.4.5 Synthèse	24
1.5 Tendances technologiques et R&D	24
1.5.1 Intelligence artificielle embarquée	24
1.5.2 Systèmes hybrides air-eau	24

1.5.3	Énergie embarquée	25
1.5.4	Sécurité et connectivité	25
1.6	Conclusion	25
2	Conception de la coque du drone aquatique de sauvetage	26
2.1	Contexte théorique	26
2.1.1	Introduction	26
2.1.2	Stabilité hydrostatique des corps flottants	27
2.1.3	Nombre de Reynolds (Re)	29
2.1.4	Nombre de Froude (Fr)	29
2.1.5	Résistance hydrodynamique	30
2.1.6	Génération de portance et effets angulaires	31
2.2	Cahier des charges du drone de sauvetage aquatique	32
2.2.1	. Objectifs généraux	32
2.2.2	Contraintes fonctionnelles	32
2.2.3	Contraintes techniques	33
2.2.4	Contraintes environnementales	33
2.2.5	Contraintes économiques et pratiques	33
2.2.6	Exigences de validation	33
2.3	Géométrie de la coque et conception hydrodynamique	34
2.4	Répartition interne et positionnement des composants	39
2.4.1	Systèmes de propulsion	39
2.4.2	Compartiments batteries et électronique	39
2.4.3	Canal central	40
2.4.4	Équilibre et stabilité	40
2.5	Considérations structurelles	40
2.6	Dimensionnement du système de propulsion	42
2.6.1	Estimation de la traînée hydrodynamique via la hausse de la ligne de flottaison	42
2.6.1.0.1	À $v = 2 \text{ m/s}$:	42
2.6.1.0.2	À $v = 2,5 \text{ m/s}$:	43
2.6.1.0.3	À $v = 3 \text{ m/s}$:	43
2.6.2	Choix du système de propulsion	44

2.6.3	Estimation de la puissance à 3 m/s	44
2.6.4	Choix de la batterie	45
3	Étude structurelle de la coque de sauvetage aquatique	48
	Matériaux composites dans la structure du drone aquatique	48
3.1	Introduction	54
3.2	Choix du matériaux utilisés	54
3.2.1	Peaux en fibre de verre	54
3.2.2	Fibre de verre comme matériau composite principal	54
3.2.3	Matériaux de noyau pour structures sandwich	55
3.3	Méthodologie expérimentale	55
3.3.1	Fabrication des plaques composites	55
3.3.2	Préparation des éprouvettes	59
3.3.3	Réalisation des essais mécaniques	59
3.3.3.1	Essai de traction	59
3.3.3.2	Essai de flexion trois points	59
3.4	Résultats expérimentaux	60
3.4.1	Paramètres de simulation	61
3.4.2	Préparation de la géométrie	61
3.4.3	Définition des propriétés mécaniques du matériau	62
3.4.4	Conditions aux limites et chargement appliqué	62
3.4.5	Stratégie de maillage	63
3.4.6	Validation expérimentale du maillage	63
3.4.6.1	Validation numérique par comparaison avec l'expérimentation	64
3.4.7	Post-traitement et analyse des résultats	66
3.5	Bilan	67
3.6	Étude expérimentale des matériaux composites	68
3.6.1	Présentation des éprouvettes testées	68
3.7	Résultat expérimentaux	76
3.7.1	Résultats des essais de traction	76
3.7.2	Résultats des essais de flexion	76
3.7.3	Tableau comparatif et analyse critique	77

3.7.4	Discussion sur les matériaux sandwichs	77
3.7.5	Propositions d'amélioration	77
3.7.6	Conclusion de l'étude expérimentale	77
4	Analyse hydrodynamique de la coque du drone aquatique de sauvetage par simulation CFD	79
4.1	Contexte théorique	79
4.1.1	Introduction	79
4.1.2	Modélisation numérique et techniques de simulation à surface libre	79
4.1.3	Équations gouvernantes du flux de fluide	81
4.2	Simulation numérique de l'écoulement (CFD)	83
4.2.1	Objectifs de la simulation	83
4.2.1.1	Grandeurs étudiées	83
4.2.1.2	Hypothèses simplificatrices	83
4.2.2	Préparation de la géométrie et simplifications	83
4.2.2.1	Nettoyage et réduction de la complexité	84
4.2.2.2	Application de la symétrie	84
4.2.2.3	Positionnement et immersion	84
4.2.3	Définition du domaine et conditions aux limites	84
4.2.3.1	Dimensions du domaine de calcul	84
4.2.3.2	Conditions d'entrée	84
4.2.3.3	Condition de sortie	85
4.2.3.4	Parois latérales, supérieure et inférieure	85
4.2.3.5	Surface du drone	85
4.2.3.6	Fraction de phase et ligne de flottaison	85
4.2.4	Génération du maillage	85
4.2.4.1	Type de maillage	86
4.2.4.2	Raffinement local autour de la surface libre	86
4.2.4.3	Caractéristiques globales du maillage	86
4.2.5	Modèles physiques et paramètres de simulation	87
4.2.5.1	Modèle physique	87
4.2.5.2	Paramètres temporels	87
4.2.5.3	Calcul du nombre de CFL	88

4.2.5.4	Durée simulée et critères de convergence	89
4.2.6	Analyse des résultats hydrodynamiques	89
4.2.6.1	Forces globales : traînée et portance	89
4.2.6.2	Distribution de la pression et des phases	90
4.2.7	Validation et discussion	92
4.2.7.1	Méthodologie basée sur une surface corrigée via la montée de la ligne de flottaison	92
5	Réalisation de la coque du drone aquatique de sauvtage	94
5.1	Liste des composants et logistique d'approvisionnement	94
5.2	Méthodologie de réalisation de la coque	96
5.2.1	2. Drapage composite de la coque	100
	Conclusion générale	102
	Bibliographie	105
A	Annexe	107

Liste des tableaux

1.1	Comparaison de drones aquatiques utilisés dans le sauvetage	22
2.1	Caractéristiques techniques du drone de sauvetage aquatique	47
3.1	Résultats des essais de flexion	60
3.2	Résultats des essais de flexion	74
3.3	Comparaison des modules mécaniques mesurés pour chaque type d'éprouvette	77
4.1	Forces de traînée et portance extraites des trois simulations	89
4.2	Comparaison des forces de traînée estimées (via Δh) et obtenues par CFD	93
5.1	Liste prévisionnelle des composants à acquérir pour le prototype	95
5.2	Sites d'achat et pays d'origine des composants	95

Table des figures

1.1	EMILY Emergency Integrated Lifesaving Lanyard	20
1.2	SAVER Smart Lifebuoy Robot	21
1.3	BlueROV2	21
2.1	métacentre	28
2.2	Vue de face du drone aquatique	34
2.3	Vue arrière avec les sorties des jets	34
2.4	Vue inférieure mettant en évidence les poignées de récupération	35
2.5	Vue latérale gauche du drone	35
2.6	Vue isométrique du drone de sauvetage aquatique	36
2.7	Vue de dessus montrant la géométrie en U	36
2.8	Géométrie de l'angle d'entrée	37
2.9	positionnement de système de propulsion	39
2.10	Répartition interne et positionnement des composants	40
2.11	Traînée passive en fonction de la vitesse pour un mannequin masculin remorqué à des profondeurs comprises entre 0,0 m et 1,0 m. Le nombre de Froude, Fr , est basé sur la longueur allant des doigts des mains aux orteils.	43
2.12	système de propulsion	44
3.1	Imprégnation manuelle de chaque couche avec de la résine époxy	56
3.2	Superposition des couches selon lempilement souhaité, jusqu'à obtention de l'épaisseur finale.	56
3.3	Application d'un filet de drainage	57
3.4	application un film de pelage.	57
3.5	Mise sous vide de l'ensemble à l'aide d'une pompe et d'un sac étanche.	58
3.6	Découpe précise des éprouvettes à l'aide d'une machine CNC à commande numérique.	58
3.7	Courbes de flexion pour la fibre de verre stratifiée 5 couches (test_1 à test_4)	60

3.8	Géométrie 3D du drone aquatique importée depuis SolidWorks dans ansys pour l'analyse structurelle..	61
3.9	Maillage global du modèle avec une taille d'élément de 1 mm.	63
3.10	Maillage initial avec des éléments grossiers	63
3.11	Maillage intermédiaire avec une densité améliorée	64
3.12	Maillage fin montrant la convergence des contraintes	64
3.13	Résultats de contrainte de von Mises - traverse de 3mm.	64
3.14	Résultats obtenus par la machine de traction - traverse de 3mm.	65
3.15	Résultats de contrainte de von Mises - traverse de 4mm.	65
3.16	Résultats obtenus par la machine de traction - traverse de 4mm.	65
3.17	Résultats de contrainte de von Mises - traverse de 5mm.	66
3.18	Résultats obtenus par la machine de traction - traverse de 5mm.	66
3.19	Déplacement total (Total Deformation) sous une charge verticale valeur maximale : 6,33 mm	67
3.20	Contrainte équivalente de Von Mises valeur maximale : 30,45 MPa	67
3.21	Courbes de traction pour la fibre de verre stratifiée (test_1 à test_4)	69
3.22	Courbes de traction pour les sandwichs à âme XPS (test_1 et test_2)	70
3.23	Courbes de traction pour les sandwichs à âme polyester (4 éprouvettes)	71
3.24	Éprouvettes de traction avant et après rupture	72
3.25	Résultats de flexion sur matériaux à âme XPS, avec trois configurations de rainurage .	73
3.26	Résultats de flexion sur matériaux fibre de verre 7 couches.	74
3.27	Courbes de flexion des matériaux sandwichs à âme polyester (test_1 et test_2)	75
3.28	Éprouvettes de flexion avant et après rupture ou fléchissement permanent	76
4.1	nombre d'éléments	86
4.2	Maillage du domaine autour du drone avec raffinement près de la surface libre	87
4.3	Paramètres numériques des cas de simulation à 2 m/s et 3 m/s	88
4.4	Distribution de la pression statique Cas 1 : 2 m/s, trim 1°	90
4.5	Distribution de la pression statique Cas 2 : 3 m/s, trim 1°	90
4.6	Distribution de la pression statique Cas 3 : 3 m/s, trim 4°	91
4.7	Vue de profil distribution de pression au centre du volume de contrôle (3 m/s, 1°) . .	91
4.8	Évolution de la surface libre pour 2 m/s (gauche) et 3 m/s trim 1° (droite)	92
5.1	Schéma électrique prévisionnel du système de propulsion	96

5.2	Découpe verticale du profil du moule sur la machine CNC	97
5.3	Tracé d'un profil courbe représentatif de la coque du drone	97
5.4	Découpe du bloc de mousse par fil chaud selon le tracé défini	98
5.5	Interface de programmation du logiciel de découpe (profil supérieur)	98
5.6	Vue latérale du tracé exécuté sur mousse	98
5.7	Moule assemblé représentant le volume extérieur de la coque	99
5.8	Vue d'ensemble du moule complet usiné en mousse	99
5.9	Bloc de mousse usiné servant de noyau pour la réalisation du master du drone.	100

Liste des acronymes

Acronyme	Définition
UD	Unidirectional (fibres unidirectionnelles)
PMC	Polymer Matrix Composite (Composite à matrice polymère)
GFRP	Glass Fiber Reinforced Polymer (Polymère renforcé par fibre de verre)
EPS	Expanded Polystyrene (Polystyrène expansé)
XPE	Extruded Polyethylene (Polyéthylène extrudé)
ASTM	American Society for Testing and Materials
DXF	Drawing Exchange Format (format de fichier CAO)
CAE	Computer Aided Engineering
C3D10	Élément tétraédrique quadratique à 10 nuds
ESC	contrôleur de vitesse
CFD	Computational Fluid Dynamics (Dynamique des fluides numérique)
LCG	Longitudinal Center of Gravity (Centre de gravité longitudinal)
LCB	Longitudinal Center of Buoyancy (Centre de flottabilité longitudinal)
VCG	Vertical Center of Gravity (Centre de gravité vertical)
Re	Reynolds Number (Nombre de Reynolds)
Fr	Froude Number (Nombre de Froude)
RANS	Reynolds-Averaged NavierStokes
VOF	Volume of Fluid (Méthode du volume de fluide)
SST $k\omega$	Shear Stress Transport $k\omega$ turbulence model
DNS	Direct Numerical Simulation
CFL	CourantFriedrichsLewy (nombre adimensionnel de stabilité)

Liste des symboles

Symbole	Description
E_1, E_2, E_3	Modules d'Young dans les directions longitudinales, transverses et d'épaisseur du composite
G_{12}, G_{13}, G_{23}	Modules de cisaillement dans les plans principaux
$\nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$	Coefficients de Poisson dans les directions principales
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Contraintes normales dans les directions principales
$\tau_{12}, \tau_{13}, \tau_{23}$	Contraintes de cisaillement dans les plans principaux
$\sigma_{1,\text{lim}}, \sigma_{2,\text{lim}}, \tau_{12,\text{lim}}$	Contraintes limites pour le critère de rupture (Tsai-Hill)
$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$	Déformations normales
$\gamma_{12}, \gamma_{13}, \gamma_{23}$	Déformations de cisaillement
$\varepsilon_1^0, \varepsilon_2^0, \gamma_{12}^0$	Déformations au milieu du stratifié
$Q_{11}, Q_{22}, Q_{12}, Q_{66}$	Coefficients de la matrice de rigidité locale $[Q]$ en contrainte plane
$[Q]$	Matrice de rigidité locale d'une couche (dans le repère des fibres)
$[\bar{Q}]$	Matrice de rigidité transformée dans le repère global
$[S]$	Matrice de souplesse (inverse de $[Q]$)
$[T]$	Matrice de transformation du repère local vers global
θ	Angle d'orientation des fibres dans le stratifié
$[A]$	Matrice de rigidité membranaire du stratifié
$[B]$	Matrice de couplage flexion/traction (nulle si stratifié symétrique)
$[D]$	Matrice de rigidité en flexion du stratifié
z_k	Coordonnée en épaisseur de la couche k dans le stratifié
N_1, N_2, N_{12}	Efforts normaux et de cisaillement dans le plan
M_1, M_2, M_{12}	Moments de flexion et de torsion
$\kappa_1, \kappa_2, \kappa_{12}$	Courbures selon les directions principales
ρ	Densité du fluide (kg/m ³)
U	Vitesse du flux ou du véhicule (m/s)
L	Longueur caractéristique (m)
μ	Viscosité dynamique du fluide (Pa·s)
Re	Nombre de Reynolds
Fr	Nombre de Froude
g	Accélération de la gravité (9.81 m/s ²)
R	Résistance hydrodynamique totale (N)

R_f	Résistance à la friction de peau (N)
R_w	Résistance à la formation d'ondes (N)
R_a	Résistance de l'air (N)
R_m	Résistance diverses (appendices, gouvernail, etc.) (N)
C_f	Coefficient de friction de peau
S	Surface mouillée de la coque (m ²)
C_w	Coefficient de résistance à la vague
L	Portance hydrodynamique (N)
C_L	Coefficient de portance
A	Aire de référence (m ²)
α	Angle d'attaque (rad)
θ	Angle de trim (rad)
$\alpha_{\text{structure}}$	Inclinaison géométrique du fond de la coque (rad)
α_{eff}	Angle d'attaque effectif (rad)
CFL	Nombre de CourantFriedrichsLewy
Δt	Pas de temps (s)
Δx	Taille de maille locale (m)
$\vec{u}$	Vecteur vitesse
p	Pression (Pa)
$\vec{F}$	Forces extérieures (N)

Introduction générale

Contexte général

Les milieux marins, bien qu'essentiels aux activités humaines, demeurent des environnements complexes et souvent hostiles. Chaque année, des milliers de personnes perdent la vie par noyade dans le monde, et selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS), environ 236 000 décès par noyade sont enregistrés annuellement [1]. Ce fléau touche non seulement les populations des zones côtières, mais également les plaisanciers, les pêcheurs et les baigneurs dans les espaces récréatifs. Dans ce contexte, les dispositifs de secours doivent être à la fois rapides, fiables et capables d'intervenir dans des conditions météorologiques défavorables.

Les services de sauvetage en mer, bien qu'efficaces dans de nombreux cas, présentent plusieurs limites. Les moyens traditionnels, tels que les embarcations motorisées ou les interventions humaines directes, sont souvent contraints par le temps de réaction, la distance à parcourir, et les dangers auxquels les sauveteurs eux-mêmes peuvent être exposés. De plus, certaines zones côtières sont difficiles d'accès pour des moyens conventionnels, et le facteur temps est critique lorsqu'il s'agit de sauver une vie.

Face à ces enjeux, l'essor des technologies autonomes, et plus particulièrement celui des drones, a ouvert de nouvelles perspectives dans les domaines de la surveillance et de l'assistance en milieu marin. Si les drones aériens ont déjà prouvé leur efficacité pour localiser rapidement des victimes, leur capacité à intervenir directement en mer reste limitée. C'est dans ce cadre que le développement de drones aquatiques prend tout son sens. En combinant l'agilité des systèmes téléopérés à la robustesse des plateformes nautiques, les drones aquatiques constituent une solution innovante pour assurer un premier niveau d'intervention, en complément des secours traditionnels.

Problématique

Malgré l'intérêt croissant pour les drones marins, peu de dispositifs sont aujourd'hui spécifiquement conçus pour intervenir rapidement dans des situations de sauvetage en mer. Les prototypes existants sont encore rares, souvent coûteux, et majoritairement développés à des fins militaires ou de recherche. En milieu civil, l'adoption de ces systèmes reste freinée par des défis techniques et économiques importants : la stabilité dans des eaux agitées, la résistance à la corrosion saline, l'autonomie énergétique, la maniabilité, la sécurité d'usage, ou encore la capacité à transporter une charge utile (comme une bouée ou une victime).

Dès lors, une question centrale se pose : ****comment concevoir un drone aquatique adapté aux opérations de sauvetage en mer, alliant performance, fiabilité, sécurité et accessibilité technologique ?****

Cette problématique constitue le cœur du présent mémoire. Elle appelle une réflexion pluridisciplinaire, mobilisant à la fois des compétences en mécanique des structures, en hydrodynamique, en électronique embarquée, et en ingénierie des matériaux.

Objectifs du mémoire

L'objectif principal de ce travail est de concevoir, modéliser et réaliser un prototype de drone aquatique destiné à des missions de sauvetage en mer, notamment dans les zones côtières.

Les objectifs spécifiques sont les suivants :

- Définir les exigences fonctionnelles et techniques d'un drone de sauvetage adapté au milieu marin ;
- Concevoir une structure hydrodynamique optimisée, assurant stabilité, flottabilité et résistance aux conditions extrêmes ;
- Intégrer un système de propulsion efficace et maniable, capable d'assurer des déplacements rapides et précis ;
- Sélectionner des matériaux adaptés, notamment des composites résistants à l'eau salée, tout en maintenant un bon compromis entre légèreté et robustesse ;
- Valider le comportement du système par des simulations numériques (CFD, analyse de contraintes) ;
- Réaliser un prototype fonctionnel et tester ses performances en conditions simulées.

Structure du mémoire

Ce mémoire est structuré en plusieurs chapitres, organisés de manière logique pour suivre la progression du projet :

- Le **Chapitre 1** présente l'état de l'art sur les drones , les dispositifs de sauvetage actuels, ainsi que les technologies connexes utilisées dans ce domaine.
- Le **Chapitre 2** est consacré à la définition du cahier des charges fonctionnel et traite de la conception mécanique du drone .
- Le **Chapitre 3** étudie structurelle , en détaillant les choix de structure, de matériaux et d'architecture.
- Le **Chapitre 4** expose les simulations numériques réalisées pour évaluer les performances hydrodynamiques .
- Le **Chapitre 5** décrit la phase de réalisation du prototype,et la méthodologie à suivre .
- Enfin, une **conclusion générale** vient synthétiser les apports du projet et ouvrir sur des perspectives futures.

Ainsi, ce mémoire vise à apporter une contribution concrète au développement de solutions technologiques au service de la sécurité humaine, dans un domaine où chaque seconde compte.

Chapitre 1

État de l’art sur les drones aquatiques de sauvetage

1.1 Introduction

Les systèmes sans pilote qu’ils soient aériens (UAV), maritimes (USV), ou sous-marins (ROV/AUV) sont désormais intégrés dans des scénarios opérationnels réels, notamment dans les pays où le développement technologique dans le secteur de la sécurité maritime est soutenu. Ce chapitre a pour but d’établir un panorama complet des technologies actuelles, des typologies de plateformes existantes, et des cas d’usage concrets de drones de sauvetage aquatique. Il s’appuie sur des articles scientifiques, des projets de recherche, et des rapports industriels récents.

1.2 Typologie des drones de sauvetage aquatique

Les véhicules autonomes ou téléopérés utilisés dans les missions de sauvetage aquatique se répartissent principalement en trois grandes catégories : USV, ROV et AUV.

1.2.1 USV véhicule de surface non habité (Unmanned Surface Vehicles)

Les USV sont des drones évoluant à la surface de l’eau. Ils sont souvent conçus pour des interventions rapides et peuvent transporter du matériel de secours (bouées, gilets de sauvetage). Leur propulsion peut être assurée par des hélices, des jets d’eau ou des systèmes à pagaies. Ils peuvent être télécommandés depuis la rive ou fonctionner de manière semi-autonome grâce à des capteurs GPS et à des algorithmes de navigation.

1.2.2 ROV Véhicule sous-marin téléguidé (Remotely Operated Vehicles)

Les ROV sont reliés par câble à une station de commande à la surface. Utilisés pour l’exploration sous-marine, l’inspection de coques ou la recherche de victimes immergées, ils sont contrôlés en temps réel par un opérateur. Ils embarquent des caméras, des bras manipulateurs et des capteurs environnementaux.

1.2.3 AUV Véhicule sous-marin autonome (Autonomous Underwater Vehicles)

Contrairement aux ROV, les AUV fonctionnent de manière totalement autonome. Ils sont programmés à l'avance pour réaliser des missions de longue durée, comme la cartographie de fonds marins ou la recherche d'objets submergés. Leur usage en sauvetage reste limité à des missions d'exploration ou de localisation post-accident.

1.3 Études de cas de drones aquatiques de sauvetage

1 : EMILY Emergency Integrated Lifesaving Lanyard

Développé par Hydronalix (USA), EMILY est un USV de sauvetage ultra-rapide utilisé par les garde-côtes américains. Long de 1,2 mètre, il est capable d'atteindre une victime à une vitesse de 35 km/h et de la tracter jusqu'à la rive. Il est équipé d'une caméra embarquée, d'un haut-parleur bidirectionnel, et peut être téléopéré sur une distance allant jusqu'à 1 km.



FIGURE 1.1 – EMILY Emergency Integrated Lifesaving Lanyard

2 : SAVER Smart Lifebuoy Robot

Le projet SAVER (South Korea) a conçu une bouée autonome équipée de capteurs infrarouges pour la détection de victimes, capable de manœuvrer automatiquement vers une personne en détresse. Le système est conçu pour fonctionner de manière complètement autonome avec un retour vidéo vers la station de secours.



FIGURE 1.2 – SAVER Smart Lifebuoy Robot

Référence : Park et al., Development of Autonomous Water Rescue Robot, Ocean Engineering, 2021.[2]

3 : BlueROV2 Inspection et récupération

Blue Robotics a développé le BlueROV2, un ROV modulaire utilisé pour les inspections subaquatiques et les recherches de victimes en eau trouble. Bien qu'il ne soit pas dédié exclusivement au sauvetage, il a été employé dans des opérations post-catastrophe pour localiser des corps ou des objets.



FIGURE 1.3 – BlueROV2

Référence : Blue Robotics White Paper, 2022.[3]

Drone	Type	Autonomie	Portée	Capacités
EMILY	USV	30 min	1 km	Tracte victime, caméra, haut-parleur
SAVER	USV	45 min	600 m	Autonome, détection thermique
BlueROV2	ROV	2 h	câble 100 m	Inspection, vidéo HD

TABLE 1.1 – Comparaison de drones aquatiques utilisés dans le sauvetage

1.4 Normes, certifications et cadre réglementaire des drones aquatiques de sauvetage

L'intégration de drones aquatiques dans des missions de sauvetage en mer ne peut se faire en dehors d'un cadre normatif rigoureux. En effet, leur conception, leur exploitation et leur interopérabilité avec les systèmes de secours existants doivent répondre à un ensemble d'exigences techniques, juridiques et opérationnelles. Ces exigences assurent non seulement la fiabilité du matériel, mais aussi la sécurité des personnes, la protection des données sensibles et la conformité aux réglementations maritimes internationales. L'étude des normes applicables constitue donc une étape indispensable dans le processus de développement de ce type de dispositif.

1.4.1 Cadre normatif international et européen

Plusieurs organismes internationaux ont publié des normes directement ou indirectement applicables aux véhicules autonomes de surface (USV) à usage civil et humanitaire. À l'échelle mondiale, l'Organisation internationale de normalisation (ISO) et l'Organisation maritime internationale (OMI) jouent un rôle central dans l'élaboration de ces référentiels.

La norme **ISO 21384-3:2019** définit les exigences générales pour les systèmes de drones civils (UAS), et bien qu'elle concerne principalement les UAV, plusieurs de ses principes sont transposables aux USV, notamment en matière de gestion du risque, de documentation technique et de sécurité opérationnelle. Par ailleurs, la **directive 2014/53/UE** (RED) impose des exigences strictes pour tous les équipements radioélectriques embarqués, assurant leur compatibilité électromagnétique et leur fiabilité dans des environnements perturbés comme les zones maritimes.

Dans le contexte maritime, la convention **SOLAS** (Safety Of Life At Sea) impose depuis longtemps des normes de sécurité strictes pour les navires et les équipements de sauvetage. Bien que les drones de sauvetage aquatiques ne soient pas encore pleinement intégrés dans ce cadre, des recommandations telles que la **MSC.1/Circ.1604** de l'OMI posent les bases de leur future reconnaissance. Elles insistent notamment sur la capacité d'un système autonome à coopérer avec les moyens de sauvetage existants et à transmettre en temps réel des données fiables aux centres de coordination.

1.4.2 Sécurité fonctionnelle et cybersécurité

Au-delà de la conformité mécanique et environnementale, les drones modernes embarquent des systèmes électroniques et logiciels de plus en plus complexes, parfois critiques. Leur défaillance pourrait compromettre la mission de sauvetage ou créer un risque pour les opérateurs et les victimes.

Dans ce cadre, la norme **IEC 61508** sur la sécurité fonctionnelle est souvent utilisée comme référence pour les systèmes électroniques programmables. Elle fournit un cadre pour l'analyse des modes de défaillance, la redondance des composants critiques et les mécanismes de repli en cas d'erreur.

Parallèlement, la norme **ISO/IEC 27001** sur la gestion de la sécurité de l'information est particulièrement pertinente lorsque les drones collectent ou transmettent des données sensibles. Cette norme devient incontournable dès lors qu'un drone opère dans un réseau connecté, notamment lorsqu'il est intégré à un système de commandement ou à une infrastructure cloud. Des solutions de chiffrement des communications, de surveillance des intrusions et de traçabilité des accès sont recommandées, voire obligatoires dans certains contextes.

1.4.3 Normes de conception mécanique et environnementale

La conception structurelle d'un drone de sauvetage aquatique est également soumise à des normes spécifiques :

- La **norme ISO 12215** encadre les exigences structurelles des coques de petites embarcations, ce qui est pertinent dans le cas de drones naviguant à la surface.
- La **norme ISO 19030** propose des méthodes pour évaluer la performance hydrodynamique, notamment la traînée liée à l'état de surface un facteur clé dans les déplacements rapides pour le sauvetage.
- Enfin, les normes relatives à la résistance à la corrosion (ex. **ISO 9227** pour les essais au brouillard salin) sont essentielles pour garantir la longévité des composants soumis à l'environnement marin.

1.4.4 Reconnaissance opérationnelle et normalisation émergente

Si les normes existantes permettent de cadrer partiellement la conception et l'usage des drones marins, il est important de noter que ce domaine reste en évolution. Plusieurs initiatives sont en cours au sein de l'OMI et de l'Union européenne pour adapter les référentiels aux systèmes autonomes. Le concept de **MASS** (Maritime Autonomous Surface Ships), actuellement en phase de discussion, vise à définir les conditions d'opération de ces systèmes à l'échelle internationale. Des essais sont également menés dans des ports pilotes, en collaboration avec des garde-côtes ou des ONG maritimes, pour établir des standards d'usage, notamment en matière d'assistance à personne.

1.4.5 Synthèse

Ainsi, toute conception sérieuse d'un drone aquatique de sauvetage doit intégrer en amont ces dimensions normatives. Elles conditionnent l'autorisation de mise en service, la fiabilité des missions, et la compatibilité avec les acteurs du secours en mer. Une veille réglementaire continue est également nécessaire, car de nombreuses normes relatives aux véhicules autonomes, à la cybersécurité ou à l'intelligence embarquée évoluent rapidement.

1.5 Tendances technologiques et R&D

L'évolution rapide des technologies numériques, énergétiques et matérielles influence profondément le domaine des drones de sauvetage aquatique. Les axes de recherche actuels visent à renforcer leur autonomie, leur intelligence décisionnelle, leur efficacité en mission et leur sécurité opérationnelle.

1.5.1 Intelligence artificielle embarquée

L'intégration de l'intelligence artificielle, et plus particulièrement des réseaux de neurones profonds (deep learning), constitue une avancée majeure. Ces algorithmes permettent la détection automatique de corps humains à la surface de l'eau ou partiellement immergés, même dans des conditions météorologiques dégradées. Des modèles entraînés sur des jeux de données maritimes spécifiques peuvent ainsi distinguer un nageur en détresse d'un débris flottant.

Au-delà de la vision par ordinateur, l'IA est également utilisée pour l'optimisation des trajectoires : en analysant en temps réel les données environnementales (vents, courants, obstacles), le drone peut adapter sa navigation pour maximiser la couverture d'une zone de recherche. Certains systèmes embarqués utilisent également des mécanismes de priorisation automatique, attribuant plus de ressources aux secteurs à forte probabilité de présence humaine.

Réf. : Gao et al., Human Detection for Maritime Search, *MDPI Sensors*, 2022.[4]

1.5.2 Systèmes hybrides air-eau

Une tendance innovante concerne le développement de plateformes hybrides combinant les capacités d'un drone aérien (UAV) avec celles d'un véhicule de surface autonome (USV). Dans ces systèmes, le drone aérien assure la reconnaissance initiale depuis les airs, identifie une cible potentielle (victime en mer) et déploie un module flottant détachable qui se pose à la surface pour fournir une aide immédiate (bouée, radeau, dispositif de repérage GPS).

Ce couplage permet de combiner la rapidité de déploiement et la large couverture aérienne avec la capacité à interagir directement avec la victime via un module flottant. Ce concept de drone modulaire est particulièrement prometteur pour les missions à long rayon d'action ou dans des zones où l'intervention humaine directe est retardée.

Réf. : Carrasco et al., Hybrid UAV-USV Search Systems, *Elsevier Mechatronics*, 2023.[5]

1.5.3 Énergie embarquée

L'autonomie énergétique constitue un enjeu crucial pour les drones opérant en mer, notamment en raison de la difficulté d'accès aux zones d'intervention. Les recherches actuelles portent sur plusieurs leviers d'optimisation :

- **Allégement structurel** : L'utilisation de matériaux composites (fibre de verre, carbone, sandwichs légers) permet de réduire la masse du drone sans compromettre sa résistance mécanique, ce qui diminue la consommation énergétique.
- **Batteries à haute densité** : Les batteries lithium-ion à forte densité énergétique offrent un meilleur compromis entre poids et capacité, permettant des missions plus longues avec un encombrement réduit.
- **Énergie solaire embarquée** : L'intégration de cellules photovoltaïques sur les surfaces du drone (notamment sur les ailes ou le pont supérieur pour les USV) permet de recharger en partie les batteries pendant les phases de veille ou de navigation lente, prolongeant ainsi les missions au large.

Ces avancées permettent d'envisager des opérations de plusieurs heures, voire sur plusieurs jours dans les cas de surveillance passive.

1.5.4 Sécurité et connectivité

La connectivité en temps réel est indispensable pour les drones de sauvetage, notamment pour transmettre des flux vidéo, des données de capteurs et recevoir des instructions à distance. Pour cela, plusieurs technologies sont en cours d'adoption :

- **Liaisons longue portée** : Les modems radio UHF/VHF spécialisés, la 5G maritime et les relais aériens (par drones relais ou ballons) assurent une couverture étendue, même à des dizaines de kilomètres des côtes.
- **Sécurité des communications** : Face aux risques de cyberattaque ou de détournement, les communications sont chiffrées à l'aide de protocoles robustes (TLS pour la transmission sécurisée, AES-256 pour le chiffrement des données critiques).
- **Redondance et tolérance aux pannes** : Des architectures réseau distribuées (edge computing) permettent au drone de continuer sa mission même en cas de perte temporaire de liaison, en prenant des décisions locales grâce à l'IA embarquée.

L'ensemble de ces développements place la cybersécurité au cœur des préoccupations en R&D, en lien avec les standards émergents de l'aviation autonome et des véhicules maritimes intelligents.

Réf. : Munoz et al., Cybersecurity in Maritime Drones, *IEEE Communications*, 2023. [6]

1.6 Conclusion

L'état de l'art met en lumière le fort potentiel des drones aquatiques pour les missions de sauvetage. Leur efficacité, leur autonomie et leur adaptabilité ne cessent d'évoluer. Des études de cas concrets prouvent leur intérêt opérationnel. La recherche actuelle vise à surmonter les limites d'autonomie, de perception en mer agitée, et de résistance aux environnements hostiles. Le présent travail s'inscrit dans cette dynamique en proposant une solution originale optimisée pour le sauvetage côtier.

Chapitre 2

Conception de la coque du drone aquatique de sauvetage

Introduction

La phase de conception représente une étape cruciale dans tout projet d'ingénierie, en particulier lorsqu'il s'agit de développer un système embarqué évoluant dans un environnement aussi exigeant que le milieu marin. Dans le cadre de ce projet, l'objectif est de concevoir un drone aquatique capable de porter assistance à des nageurs en situation de détresse, tout en répondant à des exigences strictes en matière de performance, de sécurité et de fiabilité.

Cette phase s'appuie sur une démarche rigoureuse mêlant analyse fonctionnelle, modélisation géométrique, choix des matériaux, dimensionnement structurel, et simulations numériques. Afin d'encadrer ce processus de manière cohérente, un cahier des charges détaillé a été établi. Ce document formalise l'ensemble des contraintes techniques, environnementales, économiques et opérationnelles liées à la conception du prototype. Il constitue ainsi le socle méthodologique sur lequel repose la suite des travaux.

Après avoir présenté ce cahier des charges, le présent chapitre décrira les différentes étapes de conception, en commençant par les considérations fonctionnelles et géométriques, suivies par l'étude structurelle et l'intégration propulsive. Enfin, les choix réalisés seront justifiés au regard des simulations mécaniques et hydrodynamiques effectuées.

2.1 Contexte théorique

2.1.1 Introduction

Comprendre les bases de la mécanique des fluides est essentiel pour prédire le comportement hydrodynamique et aérodynamique d'un drone de sauvetage aquatique. Les forces agissant sur le drone, telles que la traînée, la portance et les forces de flottabilité, sont régies par l'interaction entre la géométrie du drone et le fluide environnant (air ou eau). Dans cette section, les bases théoriques permettant d'analyser ces forces sont présentées, avec une attention particulière portée sur les nombres adimensionnels, les composants de la résistance, les paramètres hydrostatiques et les méthodes de simulation pertinentes utilisées en CFD.

2.1.2 Stabilité hydrostatique des corps flottants

La stabilité hydrostatique d'un objet flottant décrit sa capacité à résister à un renversement lorsqu'il est soumis à des perturbations externes, telles que des vagues ou des variations de répartition de la masse. Elle est essentielle dans la conception des structures navales, y compris les drones aquatiques, et s'évalue selon deux modes principaux :

- la **stabilité transversale** (roulis),
- la **stabilité longitudinale** (trim ou tangage).

Centre de gravité (G) et centre de poussée (B)

Le **centre de gravité (G)** est le point où s'applique la résultante des forces de poids du système, tandis que le **centre de poussée (B)** est le centre géométrique du volume immergé, où s'exerce la force de flottabilité.

Lorsque le corps est incliné, le centre de poussée se déplace latéralement ou longitudinalement, ce qui génère un *moment de rappel* tendant à ramener l'objet à sa position initiale, à condition que le centre de gravité soit situé sous le métacentre.

Notion de stabilité métacentrique (GM)

La stabilité initiale d'un corps flottant repose sur le concept de **hauteur métacentrique** GM , qui joue un rôle fondamental dans la capacité de l'objet à résister à l'inclinaison (roulis ou tangage).

Définition physique : la hauteur métacentrique est la distance verticale entre le centre de gravité G et le *métacentre* M . Lorsque le corps est en équilibre droit, la poussée d'Archimède passe par le centre de carène B . En cas de faible inclinaison, le volume immergé se déforme, entraînant un déplacement latéral de B . La nouvelle ligne d'action de la poussée passe alors par ce nouveau centre B' , et son intersection avec la ligne verticale initiale définit le point M .

$$GM = \overline{GM} = \frac{I}{V} - BG$$

Avec :

- I : moment quadratique de la surface de flottaison par rapport à l'axe de basculement,
- V : volume de fluide déplacé,
- BG : distance entre le centre de carène B et le centre de gravité G .

Cette hauteur métacentrique détermine la stabilité initiale du système. Plus GM est élevé, plus le moment de rappel est important :

$$M = W \cdot GM \cdot \sin(\theta)$$

où W est le poids du corps et θ l'angle d'inclinaison.

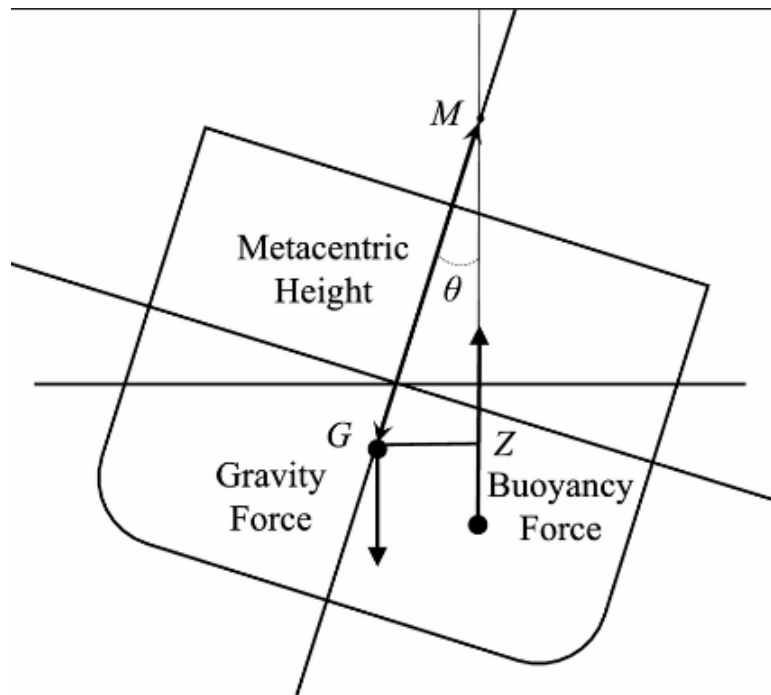


FIGURE 2.1 – métacentre

Interprétation physique le produit $GM \cdot \sin(\theta)$ représente le *bras de levier effectif* à travers lequel la poussée d'Archimède agit pour redresser le corps flottant. Ainsi, GM correspond à la capacité intrinsèque du système à générer un couple de redressement lors d'une perturbation.

Remarque : contrairement à une idée reçue, GM n'est pas simplement la distance entre le centre de gravité et le nouveau centre de poussée après inclinaison, mais bien la distance entre G et le *métacentre* M , un point géométrique résultant du comportement du centre de carène lors de petites inclinaisons.

Échelle qualitative typique :

- $GM < 0$: instable (moment de renversement),
- $GM \approx 0$: stabilité neutre,
- $0 < GM < 0,3$ m : stabilité faible (embarcation roulante),
- $0,5 < GM < 1$ m : stabilité confortable,
- $GM > 2$ m : stabilité très forte (comportement très rigide, voire brutal en houle).

La valeur de GM dépend donc fortement de la géométrie de la surface de flottaison et de la position du centre de gravité. Dans le cas de véhicules flottants comme les drones de sauvetage, le compromis entre stabilité et agilité doit être soigneusement analysé.

Stabilité longitudinale (trim)

La **stabilité en trim** concerne l'inclinaison avant/arrière du corps flottant, généralement due à un décalage entre la position longitudinale du centre de gravité (CG) et celle du centre de poussée (CB).

Lorsque ce décalage est important, il crée un moment qui incline le drone autour de son axe transversal. L'angle de trim à l'équilibre, supposé petit, peut être estimé par :

$$\theta = \frac{W \cdot d}{\rho g I}$$

Où :

-
- θ : angle de trim (en radians),
 - W : poids total du corps flottant (en N),
 - d : distance longitudinale entre le CG et le CB (en m),
 - ρ : densité de l'eau (en kg/m³),
 - g : accélération gravitationnelle (9,81 m/s²),
 - I : moment quadratique de surface de la ligne de flottaison par rapport à l'axe transversal.

Cette formule est applicable dans le cas d'angles faibles, où le comportement peut être considéré comme linéaire.

2.1.3 Nombre de Reynolds (Re)

Le **nombre de Reynolds** caractérise le rapport des forces inertielles aux forces visqueuses dans un flux de fluide et est défini comme suit :

$$Re = \frac{\rho U L}{\mu} \quad (2.1)$$

où :

- ρ est la densité du fluide,
- U est la vitesse du flux,
- L est la longueur caractéristique (par exemple, la longueur de la coque),
- μ est la viscosité dynamique du fluide.

Le nombre de Reynolds aide à déterminer le régime de flux :

- *Flux laminaire* : Se produit à faible nombre de Reynolds, caractérisé par un flux lisse et ordonné avec une faible traînée mais une instabilité potentielle.
- *Flux turbulent* : Se produit à des nombres de Reynolds élevés, caractérisé par un flux chaotique et mélangé, entraînant une traînée plus élevée mais une meilleure récupération de pression et un meilleur mélange.

2.1.4 Nombre de Froude (Fr)

Le **nombre de Froude** est un paramètre adimensionnel qui compare les forces inertielles aux forces gravitationnelles dans le flux de fluide, particulièrement important pour les flux à surface libre tels que les navires et les véhicules aquatiques. Il est défini comme suit :

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gL}} \quad (2.2)$$

où :

- U est la vitesse caractéristique du vaisseau (m/s),
- g est l'accélération due à la gravité (9.81 m/s²),
- L est la longueur caractéristique, généralement la longueur de la ligne de flottaison (m).

Le nombre de Froude aide à classer le régime de flux du vaisseau :

- *Régime de déplacement* : $Fr < 0.4$, où le vaisseau se déplace en déplaçant de l'eau.
- *Régime semi-déplacement* : $0.4 < Fr < 0.9$, caractérisé par une résistance croissante à la formation d'ondes.

-
- *Régime de plané* : $Fr > 0.9$, où le vaisseau plane partiellement ou totalement à la surface de l'eau, réduisant la traînée due aux vagues.

Comprendre le nombre de Froude est essentiel pour prédire la résistance des vagues et concevoir des formes de coque efficaces.

2.1.5 Résistance hydrodynamique

La résistance hydrodynamique totale R agissant sur un vaisseau ou un véhicule aquatique se déplaçant dans l'eau est la somme de plusieurs composants, principalement :

$$R = R_f + R_w + R_a + R_m + \dots \quad (2.3)$$

où :

- R_f est la **résistance à la friction de peau**, causée par les tensions de cisaillement visqueuses sur la surface mouillée,
- R_w est la **résistance à la formation d'ondes**, causée par l'énergie perdue dans la génération des vagues,
- R_a est la **résistance de l'air**,
- R_m est la **résistance divers**, comprenant les appendices, le gouvernail et d'autres sources mineures.

Pour simplifier, dans de nombreuses études CFD portant sur l'hydrodynamique de la coque, la résistance de l'air R_a et les résistances diverses R_m sont souvent négligées, en supposant que leurs contributions sont faibles par rapport à R_f et R_w .

Résistance à la friction de peau R_f : La résistance à la friction de peau provient des tensions de cisaillement visqueuses sur la surface de la coque mouillée. Elle peut être estimée à l'aide de la ligne de corrélation [7] pour le coefficient de friction C_f :

$$C_f = \frac{0.075}{(\log_{10} Re - 2)^2} \quad (2.4)$$

où Re est le nombre de Reynolds basé sur la longueur de la coque. Ensuite, la résistance à la friction de peau est :

$$R_f = \frac{1}{2} \rho U^2 S C_f \quad (2.5)$$

avec :

- ρ : densité du fluide,
- U : vitesse du vaisseau,
- S : surface mouillée.

Résistance à la formation d'ondes R_w : La résistance à la formation d'ondes dépend fortement du nombre de Froude et de la géométrie de la coque. Elle est plus complexe à modéliser analytiquement mais peut être exprimée de manière générale comme suit :

$$R_w = \frac{1}{2} \rho U^2 S C_w \quad (2.6)$$

où C_w est le coefficient de résistance à la vague, souvent déterminé expérimentalement ou par des simulations CFD. C_w est une fonction du nombre de Froude Fr et des paramètres de la forme de la coque.

Dans ce travail, l'accent sera mis sur la capture précise de R_f et R_w à travers des simulations CFD pour prédire la résistance hydrodynamique totale et optimiser la conception de la coque.

2.1.6 Génération de portance et effets angulaires

Bien que la portance soit généralement associée aux véhicules aériens, elle joue un rôle significatif dans le comportement hydrodynamique des drones aquatiques, surtout à des vitesses plus élevées ou lors de transitions vers les régimes semi-plané ou plané. Dans ce contexte, la portance résulte de la distribution de pression autour de la coque, influencée par la géométrie du véhicule, sa vitesse et son orientation par rapport au flux.

Portance hydrodynamique La portance L est la force agissant perpendiculairement à la direction du flux entrant et est généralement exprimée par la relation suivante :

$$L = \frac{1}{2} \rho U^2 C_L A \quad (2.7)$$

où :

- ρ : densité du fluide (kg/m^3),
- U : vitesse relative entre le fluide et le corps (m/s),
- C_L : coefficient de portance (dépend de la forme et des conditions de flux),
- A : aire de référence (généralement l'aire projetée horizontale).

Pour un drone aquatique opérant près de la surface libre, cette portance est principalement générée par la distribution asymétrique de pression entre les sections avant et arrière de la coque.

Angle d'attaque (α) L'angle d'attaque est défini comme l'angle entre l'axe longitudinal du véhicule (ou une autre ligne de référence géométrique) et le flux entrant.

- Un angle d'attaque positif augmente la différence de pression entre les surfaces supérieure et inférieure, générant ainsi de la portance.
- Au-delà d'une valeur critique (α_{stall}), la séparation du flux peut se produire, entraînant une chute brusque de la portance et une augmentation de la traînée.

Dans les coques, l'angle d'attaque est souvent induit dynamiquement par l'angle de trim du véhicule plutôt que d'être une caractéristique géométrique fixe.

Angle de trim (θ) L'angle de trim fait référence à l'inclinaison angulaire entre la ligne de quille du drone et la surface horizontale de l'eau.

- Il varie avec la répartition du poids et les forces hydrodynamiques pendant le mouvement.
- Un trim positif (position bow-up) augmente l'angle d'attaque effectif, améliorant la génération de portance à la poupe, ce qui est typique du comportement plané.

L'angle d'attaque effectif peut être approximé comme suit :

$$\alpha_{\text{eff}} \approx \theta + \alpha_{\text{structure}} \quad (2.8)$$

où $\alpha_{\text{structure}}$ est l'inclinaison géométrique du fond de la coque.

Angle de nez (ou angle d'entrée) L'angle de nez, ou angle d'entrée, est l'angle formé par la section avant de la coque dans le plan longitudinal vertical.

- Un angle d'entrée plus aigu aide la coque à percer l'eau plus facilement, réduisant l'impact des vagues et des éclaboussures, et minimisant la formation de vagues à l'avant.
- Il améliore également l'attachement du flux le long de la coque, contribuant à une portance plus stable et à une traînée de pression plus faible.

En conjonction avec l'angle de trim, l'angle d'entrée détermine la manière dont la coque passe des modes de déplacement aux modes de plané.

Influence combinée sur la portance et la stabilité La génération de portance est régie par les effets combinés de :

- **L'angle de trim**, qui contrôle dynamiquement la quantité de portance produite,
- **L'angle d'attaque**, qui façonne la distribution de pression autour de la coque,
- **L'angle de nez**, qui affecte l'entrée du flux, la formation des vagues et le comportement local de la portance.

Un déséquilibre entre ces angles peut entraîner des instabilités telles que la direction de la proue, le porpoising ou un trim dynamique indésirable. Inversement, une configuration bien optimisée permet au drone de bénéficier d'une portance hydrodynamique partielle à des vitesses plus élevées, réduisant ainsi la traînée globale et améliorant l'efficacité énergétique.

2.2 Cahier des charges du drone de sauvetage aquatique

Le présent cahier des charges définit les exigences fonctionnelles, techniques et environnementales relatives à la conception et au développement du drone aquatique de sauvetage. Il a pour objectif de guider les choix d'ingénierie tout au long du projet, en assurant une cohérence entre les besoins opérationnels et les solutions techniques mises en œuvre.

2.2.1 . Objectifs généraux

- Concevoir un drone aquatique capable d'intervenir rapidement pour porter assistance à un nageur en détresse.
- Garantir la flottabilité, la stabilité et la résistance mécanique de la structure dans un environnement marin.
- Intégrer un système de propulsion efficace permettant une vitesse de croisière d'au moins 3 m/s.
- Assurer une autonomie minimale de 10 min à 15 min en fonctionnement continu.
- Permettre le transport et la commande du drone par un opérateur à distance.

2.2.2 Contraintes fonctionnelles

- Le drone doit pouvoir supporter une masse humaine d'environ 70 kg en surface sans chavirer.

-
- Il doit être facilement déployable depuis une plage ou un quai par une seule personne.
 - Il doit intégrer des compartiments étanches pour les composants électroniques.
 - L'accès aux éléments internes (moteurs, batteries, électronique) doit être simple et sécurisé.

2.2.3 Contraintes techniques

- La coque doit être réalisée en composite à base de fibre de verre pour allier légèreté et résistance mécanique.
- Le système de propulsion repose sur deux propulseurs type waterjet de .
- L'alimentation électrique est assurée .
- Le système doit intégrer un contrôleur ESC de puissance adaptée (minimum 150 A par moteur).
- Les composants doivent être refroidis par eau et disposer de protections contre les surcharges.

2.2.4 Contraintes environnementales

- Résistance à l'eau salée (corrosion, humidité).
- Température de fonctionnement : 10 °C à 45 °C.
- Résistance aux chocs liés à l'agitation des vagues et à une manipulation en urgence.
- Visibilité : la coque doit être peinte dans une couleur vive (orange ou rouge) pour faciliter sa détection visuelle.

2.2.5 Contraintes économiques et pratiques

- Budget maximal estimé : **1500** .
- Disponibilité locale ou en ligne des composants principaux.
- Procédés de fabrication accessibles dans le contexte du projet (ex. : stratification manuelle, découpe CNC).

2.2.6 Exigences de validation

- Validation expérimentale par essais de traction, flexion et test de flottaison.
- Validation numérique par simulation structurelle (Abaqus) et hydrodynamique (CFD).
- Prototype fonctionnel testé en bassin ou milieu contrôlé.

À l'issue de la définition des exigences fonctionnelles et techniques établies dans le cahier des charges, une étape essentielle consiste à vérifier la faisabilité énergétique et mécanique du drone. En effet, pour garantir une autonomie suffisante, une vitesse de déplacement adéquate et une capacité de remorquage fiable, il est impératif de dimensionner avec rigueur le système de propulsion et l'alimentation énergétique associée.

La section suivante s'attache ainsi à déterminer :

- la puissance nécessaire à la propulsion, en tenant compte de la résistance hydrodynamique estimée,
- la capacité des batteries requise pour assurer une autonomie opérationnelle minimale,
- le choix de la tension d'alimentation optimale en fonction des courants admissibles et de l'efficacité électrique,

-
- et, plus globalement, la cohérence entre le système de propulsion, les contraintes structurelles et les besoins en énergie embarquée.

Ce travail de dimensionnement constitue une étape clé pour assurer la viabilité technique du prototype, en garantissant un équilibre entre performance, masse, coût et autonomie.

2.3 Géométrie de la coque et conception hydrodynamique

La géométrie de la coque du drone aquatique a été conçue pour optimiser l'équilibre entre l'efficacité hydrodynamique, la stabilité et la manœuvrabilité. La forme extérieure résulte à la fois des exigences fonctionnelles et des considérations de performance.

Illustrations de la géométrie externe

La figure suivante présente les vues principales du drone aquatique modélisé sur SolidWorks, illustrant sa forme en U caractéristique, ses poignées de récupération, ainsi que les emplacements prévus pour les systèmes de propulsion et les compartiments électroniques.

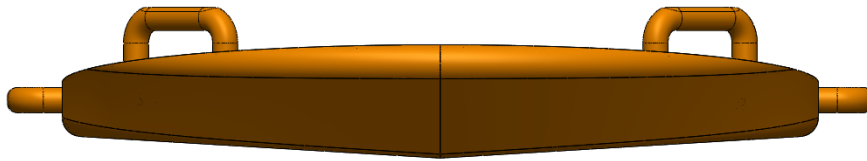


FIGURE 2.2 – Vue de face du drone aquatique

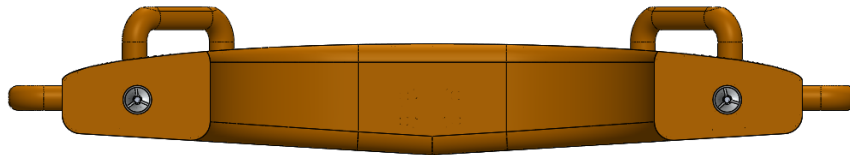


FIGURE 2.3 – Vue arrière avec les sorties des jets

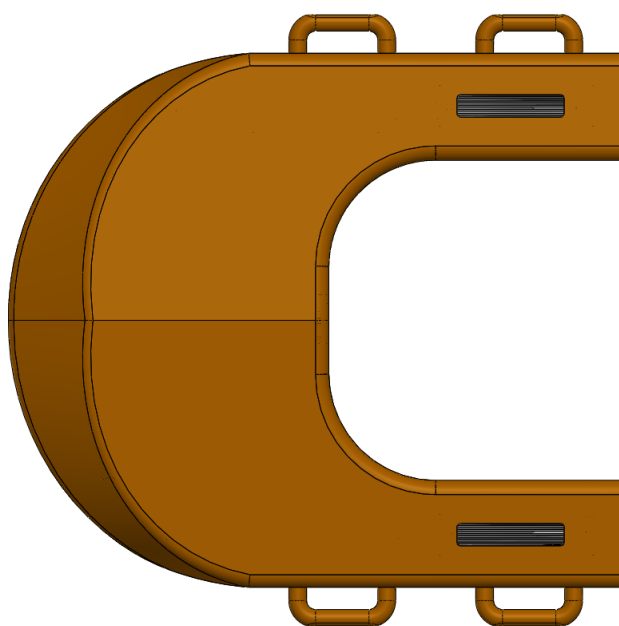


FIGURE 2.4 – Vue inférieure mettant en évidence les poignées de récupération

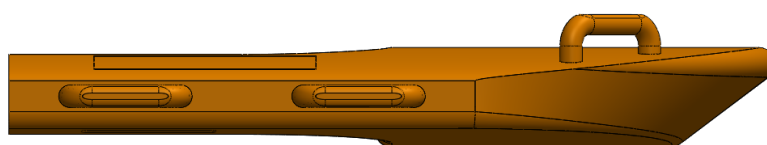


FIGURE 2.5 – Vue latérale gauche du drone

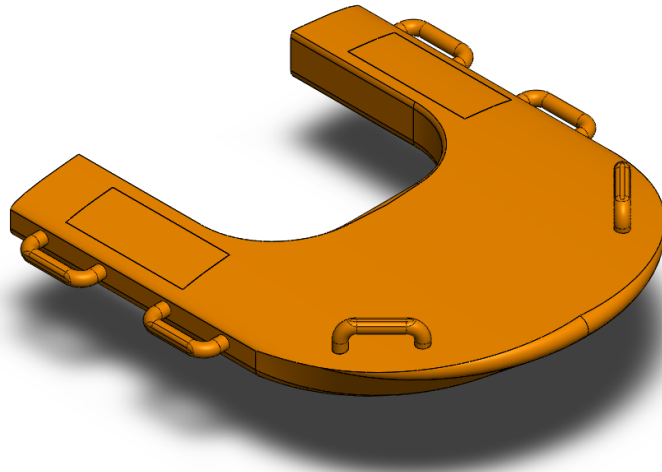


FIGURE 2.6 – Vue isométrique du drone de sauvetage aquatique

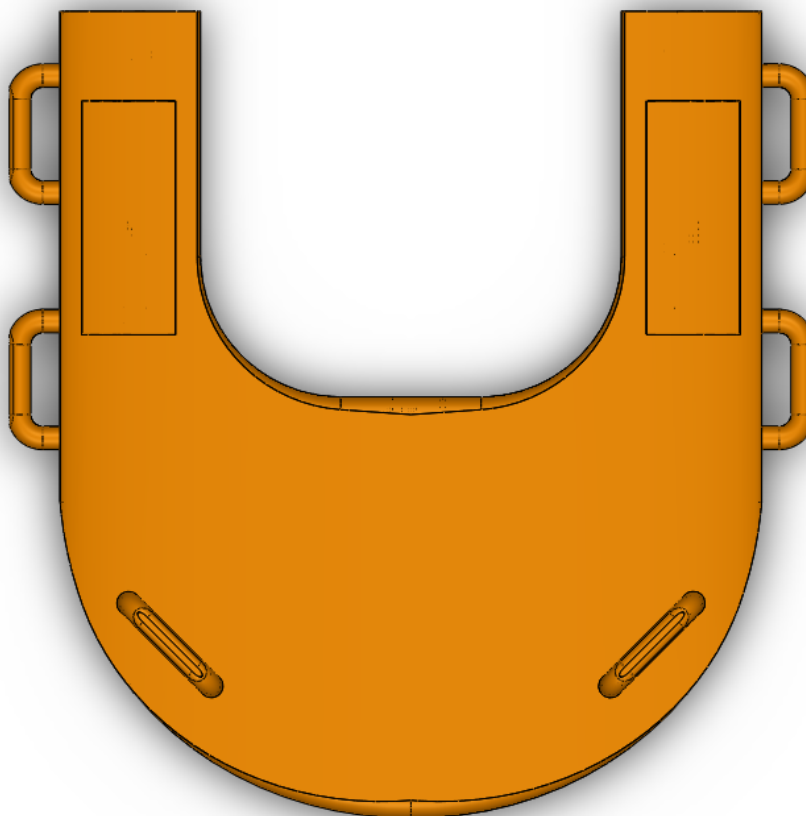


FIGURE 2.7 – Vue de dessus montrant la géométrie en U

Les dimensions principales de la coque sont d'environ 1100 mm de longueur, 900 mm de largeur et 140 mm d'épaisseur verticale maximale. Elle intègre les caractéristiques suivantes : Le dessin de définition détaillé est présenté en ??.

- Un angle d'entrée à l'avant de 45° favorisant la pénétration dans l'eau et réduisant la formation de vague frontale.
- Une coque en V peu prononcé avec un angle de deadrise de 5° , en accord avec les travaux de Tavakoli, qui démontrent qu'une telle configuration permet un bon compromis entre performance en déjaugage, stabilité transversale et manœuvrabilité.
- Un centre de gravité légèrement en arrière du centre de carène, générant un angle d'assiette statique d'environ 4° , favorable à la création de portance dynamique à vitesse élevée.
- Des transitions arrondies entre les surfaces, évitant les discontinuités abruptes dans l'écoulement et facilitant la fabrication en matériaux composites.

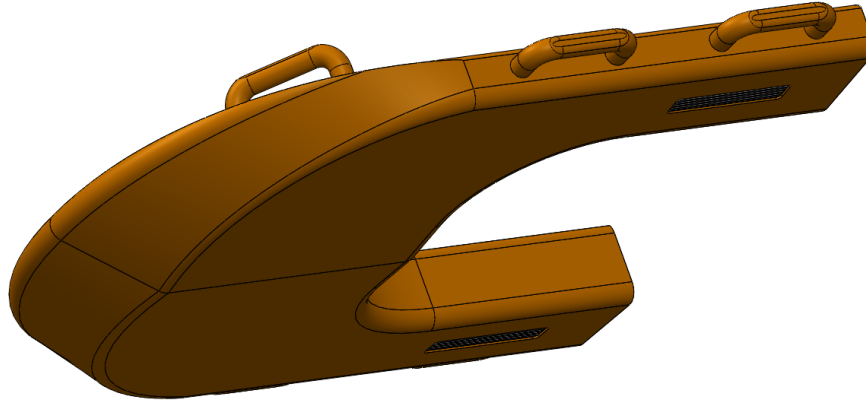


FIGURE 2.8 – Géométrie de l'angle d'entré

Ces choix géométriques procurent plusieurs avantages hydrodynamiques, comme mentionné dans la revue de Tavakoli, Sasan et Zhang. [8].

- **Réduction de la traînée** : la forme profilée à l'avant et l'angle de deadrise réduit permettent de minimiser la surface mouillée et d'éviter les zones de séparation, limitant ainsi la traînée de pression.
- **Amélioration de la stabilité** : la largeur importante et la coque en V peu prononcée contribuent à une stabilité transversale statique et dynamique, même en présence de perturbations ou de charges dissymétriques.
- **Génération de portance partielle à haute vitesse** : l'assiette positive induite par le positionnement du centre de gravité crée une portance arrière, réduisant l'immersion de la coque et donc la résistance.
- **Bon comportement en virage** : la géométrie en V génère des forces latérales suffisantes pour permettre des changements de direction efficaces tout en assurant une stabilité prédictible.

La géométrie de la coque a ainsi été optimisée pour répondre aux contraintes hydrodynamiques et pratiques, tout en restant compatible avec les outils de simulation numérique utilisés dans le cadre de ce projet.

Calculs de stabilité hydrostatique

Les paramètres extraits depuis SolidWorks permettent d'évaluer la stabilité statique du drone, tant en roulis (transversal) qu'en tangage (longitudinal). On s'appuie sur les principes définis dans la partie théorique.

1. Stabilité en roulis (transversale)

Selon *Britannica* [9] la hauteur métacentrique transversale GM_{roll} est donnée par :

$$GM_{\text{roll}} = \frac{I_{\text{roll}}}{V} - BG$$

Avec :

- $I_{\text{roll}} = 0,0459 \text{ m}^4$ (correspondant à $My = 4,5917 \times 10^{10} \text{ mm}^4$),
- $V = 0,013 \text{ m}^3$: volume d'eau déplacé,
- $BG = 0,04 \text{ m}$: distance verticale entre le centre de poussée et le centre de gravité.

$$GM_{\text{roll}} = \frac{0,0459}{0,013} - 0,04 = 3,53 - 0,04 = \boxed{3,49 \text{ m}}$$

Le drone présente une excellente stabilité en roulis.

2. Stabilité en tangage (longitudinale)

La stabilité longitudinale repose sur le moment quadratique par rapport à l'axe transversal :

$$GM_{\text{pitch}} = \frac{I_{\text{pitch}}}{V} - BG$$

Avec :

- $I_{\text{pitch}} = 0,0390 \text{ m}^4$ (correspondant à $Mx = 3,9016 \times 10^{10} \text{ mm}^4$),
- $V = 0,013 \text{ m}^3$,
- $BG = 0,04 \text{ m}$.

$$GM_{\text{pitch}} = \frac{0,0390}{0,013} - 0,04 = 3,00 - 0,04 = \boxed{2,96 \text{ m}}$$

Le drone montre également une très bonne stabilité longitudinale.

3. Angle de trim statique

L'angle de trim θ causé par un décalage longitudinal entre le centre de gravité et le centre de poussée est estimé par :

$$\theta = \frac{W * d}{\rho g I_{\text{pitch}}}$$

Avec :

- $W = 130 \text{ N}$: poids du drone,
- $d = 0,0694 \text{ m}$: distance entre CG et CB,
- $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$,
- $I_{\text{pitch}} = 0,0390 \text{ m}^4$.

$$\theta = \frac{130 \cdot 0,0694}{1000 \cdot 9,81 \cdot 0,0390} = \frac{9,022}{382,59} \approx \boxed{0,0236 \text{ rad}} \approx \boxed{1,35^\circ}$$

Ce trim reste modéré, et potentiellement utile pour faciliter le déjaugage à vitesse élevée.

2.4 Répartition interne et positionnement des composants

La configuration interne du drone a été conçue de manière à optimiser la répartition des masses, l'efficacité propulsive, ainsi que la facilité d'intégration des composants.

2.4.1 Systèmes de propulsion

Le drone est équipé de deux unités de propulsion par jet, montées à l'arrière des bras latéraux. Cette configuration symétrique permet :

- un bon équilibre des forces de poussée,
- une meilleure stabilité directionnelle,
- une capacité de virage en différenciant les vitesses de chaque jet.

Les jets sont directement reliés à des moteurs électriques étanches, fixés sur des supports internes rigides pour limiter les vibrations et assurer un alignement optimal.



FIGURE 2.9 – positionnement de système de propulsion

2.4.2 Compartiments batteries et électronique

Les compartiments rectangulaires visibles (en rouge dans la figure) contiennent :

- les batteries de propulsion (LiPo ou équivalent),
- les modules de contrôle électronique (ESC, récepteurs, contrôleur principal).

Ils sont positionnés à l'avant de chaque bras, de manière symétrique, pour :

- recentrer le centre de gravité (CG) dans la zone postérieure souhaitée,
- améliorer la distribution longitudinale de masse,
- faciliter l'accès lors de la maintenance ou du remplacement rapide.

Chaque compartiment est prévu pour être complètement étanche, avec des joints toriques ou des systèmes de fermeture vissés.

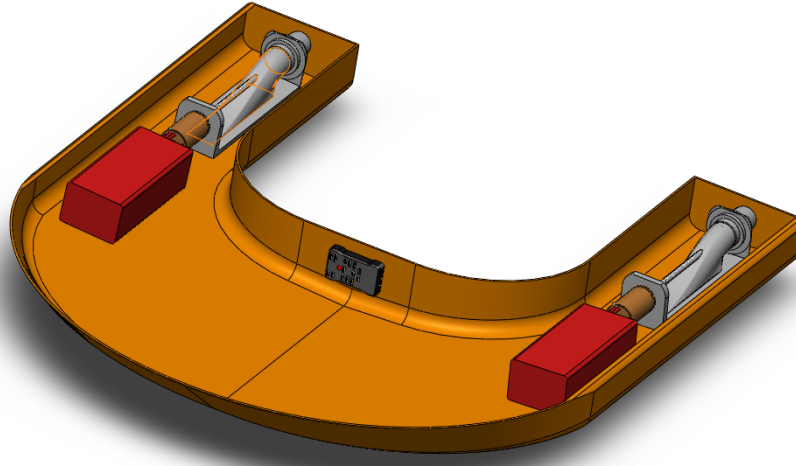


FIGURE 2.10 – Répartition interne et positionnement des composants

2.4.3 Canal central

La forme en U de la coque permet de laisser un **canal d'écoulement libre** au centre, évitant la turbulence excessive derrière la proue et réduisant la traînée frontale. Ce vide structurel contribue également à alléger la coque tout en améliorant la portance dynamique.

2.4.4 Équilibre et stabilité

L'ensemble de la configuration est pensé pour respecter les critères suivants :

- Un centre de gravité (CG) reculé par rapport au centre de carène (CB), pour générer une assiette positive favorable à la portance.
- Une symétrie gauche/droite stricte, garantissant une bonne stabilité en roulis.
- Un abaissement du CG par le positionnement bas des batteries, ce qui améliore la stabilité globale.

Cette disposition interne permet ainsi une exploitation optimale des performances hydrodynamiques, tout en assurant une maintenance aisée et une sécurité des composants critiques.

2.5 Considérations structurelles

La structure du drone aquatique a été conçue pour répondre à la fois aux exigences mécaniques liées à la mission de sauvetage, et aux contraintes de fabrication en matériaux composites. Elle doit supporter les efforts hydrodynamiques, les chocs éventuels, ainsi que la charge utile, tout en restant légère et résistante à l'eau.

Coque en matériau composite

Le matériau principal utilisé pour la réalisation de la coque est un composite à base de **fibre de verre tissée et de résine époxy**. Ce choix s'explique par plusieurs avantages :

-
- **Bonne résistance mécanique spécifique** : la fibre de verre offre un bon compromis entre rigidité, résistance et légèreté.
 - **Résistance à l'eau et à la corrosion** : les composites à matrice époxy sont adaptés aux milieux humides et salins.
 - **Compatibilité avec les procédés de fabrication locaux** : la stratification manuelle ou sous vide est bien maîtrisée et ne nécessite pas d'équipements lourds.
 - **Répartition efficace des efforts** : les propriétés anisotropes du stratifié peuvent être orientées en fonction des zones sollicitées.

L'épaisseur du stratifié est optimisée pour résister aux sollicitations mécaniques tout en limitant la masse.

Surface supérieure elliptique

La surface supérieure du drone est **de forme elliptique**, ce qui contribue à :

- **Améliorer la répartition des charges** : la forme courbe répartit les efforts mécaniques de manière homogène, réduisant les points de concentration de contraintes.
- **Renforcer la rigidité globale** : cette géométrie agit comme une voûte structurelle, augmentant la résistance aux déformations verticales.
- **Optimiser l'hydrodynamisme** : la forme douce minimise les zones de stagnation d'eau sur la surface supérieure et améliore l'écoulement externe.

Protection de surface

Pour renforcer la durabilité de la coque face à un environnement marin agressif, une couche de **gelcoat** est appliquée à la surface extérieure du composite. Ce revêtement apporte plusieurs bénéfices :

- **Protection contre l'eau salée** : le gelcoat agit comme une barrière étanche empêchant l'infiltration d'humidité et la dégradation chimique.
- **Résistance aux micro-rayures et à l'abrasion** : améliore la résistance de surface face aux frottements et aux impacts légers.
- **Finition lisse** : permet une meilleure glisse hydrodynamique et facilite le nettoyage après utilisation.

Points critiques et renforts locaux

Certaines zones sont soumises à des efforts mécaniques importants et font donc l'objet de renforcements spécifiques :

- Fixations des moteurs et des jets : soumises à des vibrations et couples moteurs.
- Points d'ancrage ou poignées : sollicités en traction lors du remorquage ou de la récupération manuelle.
- Interfaces entre compartiments et coque principale : renforcées pour éviter les décollements de couches.

2.6 Dimensionnement du système de propulsion

2.6.1 Estimation de la traînée hydrodynamique via la hausse de la ligne de flottaison

L'approche précédente, fondée sur une surface immergée constante, sous-estime la traînée à vitesses élevées, notamment en régime semi-déjaugé. Pour corriger cela, on adopte une approche semi-empirique basée sur l'élévation dynamique de la ligne de flottaison Δh , selon la corrélation suivante [10] :

$$\Delta h = k \cdot Fr^2 \cdot L$$

où :

- $k = 0,052$ est un coefficient estimé par ajustement aux résultats CFD à $Fr = 1,22$,
- $Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}}$ est le nombre de Froude [7],
- $L = 1,1$ m est la longueur de flottaison du drone.

La hauteur immergée totale devient :

$$h = h_0 + \Delta h \quad \text{avec } h_0 = 0,05 \text{ m}$$

La surface frontale immergée est estimée par $A \approx b \cdot h$, avec $b = 0,9$ m (largeur du drone).

Le coefficient de traînée $C_d = 0,3$ est pris d'après les valeurs tabulées pour une **forme de quart de sphère convexe** immergée, telles que rapportées dans des sources d'ingénierie comme *Engineering-Toolbox*.

Calculs de traînée à partir de Δh

2.6.1.0.1 À $v = 2$ m/s :

$$Fr = \frac{2}{\sqrt{9,81 \cdot 1,1}} \approx 0,91$$

$$\Delta h = 0,052 \cdot 0,91^2 \cdot 1,1 \approx 0,0474 \text{ m} \quad \Rightarrow \quad h = 0,05 + 0,0474 = 0,0974 \text{ m}$$

$$A = 0,9 \cdot 0,0974 \approx 0,0877 \text{ m}^2$$

$$F_{\text{traînée}} = \frac{1}{2} \cdot 0,3 \cdot 1024 \cdot 0,0877 \cdot 2^2 \approx 53,8 \text{ N}$$

À cette vitesse, la traînée passive d'un corps humain en surface est d'environ 117 N selon Vennell et al. [11]. La force totale nécessaire pour tracter une personne serait donc $53,8 + 117 = 170,8$ N.

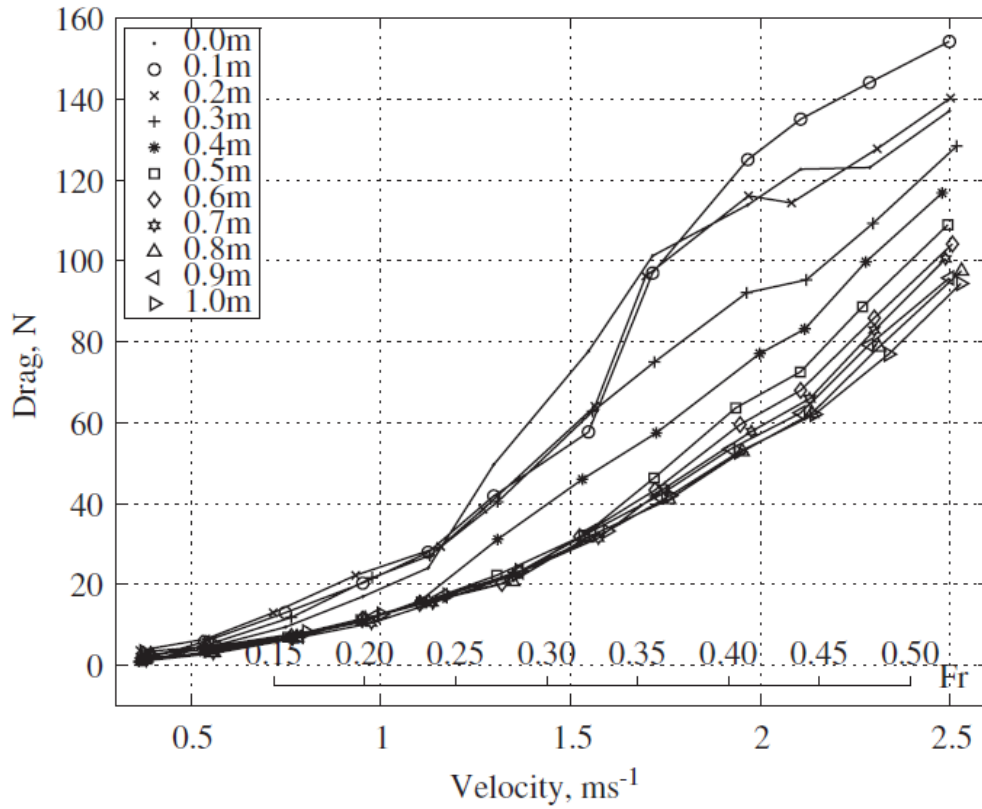


FIGURE 2.11 – Traînée passive en fonction de la vitesse pour un mannequin masculin remorqué à des profondeurs comprises entre 0,0 m et 1,0 m. Le nombre de Froude, Fr , est basé sur la longueur allant des doigts des mains aux orteils.

2.6.1.0.2 À $v = 2,5 \text{ m/s}$:

$$Fr = \frac{2,5}{\sqrt{9,81 \cdot 1,1}} \approx 1,14$$

$$\Delta h = 0,052 \cdot 1,14^2 \cdot 1,1 \approx 0,0729 \text{ m} \Rightarrow h = 0,05 + 0,0729 = 0,1229 \text{ m}$$

$$A = 0,9 \cdot 0,1229 \approx 0,1106 \text{ m}^2$$

$$F_{\text{traînée}} = \frac{1}{2} \cdot 0,3 \cdot 1024 \cdot 0,1106 \cdot 2,5^2 \approx 106,3 \text{ N}$$

À cette vitesse, la traînée d'un mannequin tracté en surface atteint 138 N. La force totale nécessaire pour tracter une personne serait donc $106,3 + 138 = 244,3 \text{ N}$. Cette valeur dépasse de peu la poussée disponible de 240 N, indiquant que le remorquage à 2,5 m/s est à la limite des capacités du système.

2.6.1.0.3 À $v = 3 \text{ m/s}$:

$$Fr = \frac{3}{\sqrt{9,81 \cdot 1,1}} \approx 1,37$$

$$\Delta h = 0,052 \cdot 1,37^2 \cdot 1,1 \approx 0,108 \text{ m} \Rightarrow h = 0,05 + 0,108 = 0,158 \text{ m}$$

$$A = 0,9 \cdot 0,158 \approx 0,1422 \text{ m}^2$$

$$F_{\text{traînée}} = \frac{1}{2} \cdot 0,3 \cdot 1024 \cdot 0,1422 \cdot 3^2 \approx 196,0 \text{ N}$$

À cette vitesse, il serait difficile de remorquer une charge supplémentaire, car la traînée du drone approche la limite de poussée disponible.

Remarques

L'approche par Δh permet d'intégrer de manière simple l'effet de la traînée d'onde sans recourir à des modèles complexes. Elle repose sur des bases théoriques établies dans les travaux de Faltinsen [10] et a été calibrée ici à partir des résultats CFD. À partir des estimations issues des mesures de Vennell et al. [11], on peut conclure que :

- Le drone peut remorquer une personne jusqu'à 2,5 m/s, mais en atteignant la limite de ses capacités.
- Une vitesse optimale de remorquage se situe autour de 2,0 m/s, avec une marge de sécurité raisonnable en termes de poussée disponible.

2.6.2 Choix du système de propulsion

Deux hydrojets commerciaux, chacun doté d'une buse de 40 mm de diamètre, ont été sélectionnés pour la propulsion du drone. Chaque unité est capable de générer une poussée maximale de 120 N, soit une poussée totale combinée :

$$T_{\text{total}} = 2 \times 120 = 240 \text{ N}$$

Cette configuration permet au drone d'atteindre une vitesse de croisière comprise entre 3 et 4 m/s, tout en maintenant une marge suffisante face à la traînée estimée dans cette plage de vitesses.

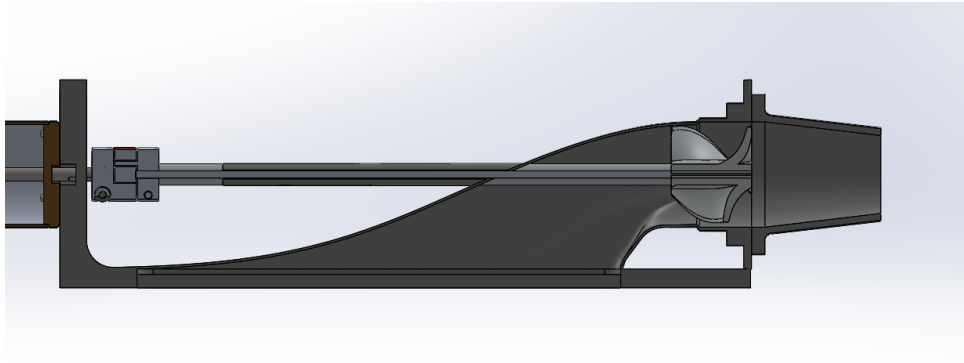


FIGURE 2.12 – système de propulsion

Le dessin de définition détaillé est présenté en ??.

2.6.3 Estimation de la puissance à 3 m/s

La puissance hydraulique nécessaire à chaque jet est donnée par :

$$P_{\text{pompe}} = \frac{1}{2} \dot{m} (v_{\text{jet}}^2 - v_{\text{entrée}}^2)$$

Le débit massique est estimé par :

$$\dot{m} = \rho A_{\text{buse}} v_{\text{jet}} = 1000 \cdot \frac{\pi \cdot 0,04^2}{4} \cdot 9,8 \approx 12,3 \text{ kg/s}$$

avec :

- $v_{\text{entrée}} = 3 \text{ m/s}$
- $v_{\text{jet}} = 9,8 \text{ m/s}$
- $D = 40 \text{ mm}$, diamètre intérieur de la buse

On obtient la puissance hydraulique par pompe :

$$P_{\text{pompe}} = \frac{1}{2} \cdot 12,3 \cdot (9,8^2 - 3^2) \approx 508 \text{ W}$$
$$P_{\text{pompe, total}} = 2 \cdot 508 = 1016 \text{ W}$$

Pour estimer la puissance électrique requise, on prend en compte les rendements :

- $\eta_{\text{pompe}} = 0,35$, ce qui est représentatif de l'efficacité modeste typique des pompes hydrojet fabriquées par impression 3D, notamment en raison de leur géométrie approximative, de la rugosité de surface et de pertes internes accrues.
- $\eta_{\text{moteur}} = 0,85$, valeur standard pour les moteurs brushless bien dimensionnés, fréquemment utilisés dans le modélisme naval et les *RC boats*.

L'efficacité globale du système devient donc :

$$\eta_{\text{totale}} = \eta_{\text{pompe}} \cdot \eta_{\text{moteur}} = 0,35 \times 0,85 = 0,2975$$

Le rendement de la pompe a été estimé à $\eta_{\text{pompe}} = 0,35$, ce qui correspond à une hypothèse prudente pour une pompe hydrojet fabriquée par impression 3D sans post-traitement interne. Cette valeur repose sur les résultats présentés dans l'étude *Investigation into Influence of Wall Roughness on the Hydraulic Characteristics of an Axial Flow Pump as Turbine*, où une rugosité de paroi de 120 à 240 μm (valeurs typiques des surfaces internes issues de l'impression 3D FDM) entraîne une diminution de puissance de l'ordre de 50 à 57% par rapport à une surface lisse. Ainsi, une pompe ayant un rendement initial de 70% peut voir son efficacité réelle chuter jusqu'à environ 35% dans de telles conditions de rugosité.

D'où la puissance électrique nécessaire :

$$P_{\text{moteur, total}} = \frac{1016}{0,2975} \approx 3415 \text{ W}$$
$$P_{\text{moteur, unitaire}} = \frac{3415}{2} \approx 1708 \text{ W}$$

Deux moteurs brushless de 2600 W ont donc été sélectionnés, offrant une marge de sécurité suffisante pour compenser les pertes additionnelles et les charges dynamiques en fonctionnement réel. Chaque moteur présente une spécification de 2000 Kv, avec une intensité maximale admissible de 113 A et une tension d'alimentation maximale de 23 V. Ces caractéristiques assurent une compatibilité adéquate avec le système de propulsion hydrojet à haut régime et garantissent une réponse rapide et une capacité de montée en charge élevée.

2.6.4 Choix de la batterie

Pour deux moteurs de 2600W, la puissance totale requise est :

$$P_{\text{moteurs total}} = 5200 \text{ W}$$

Avec des batteries de 24 V, le courant nécessaire est :

$$I_{\text{total}} = \frac{5200}{24} \approx 216 \text{ A}$$

Pour deux batteries de 25 Ah, l'autonomie estimée est :

$$t = \frac{50 \text{ Ah}}{216 \text{ A}} \approx 0,23 \text{ heures} = 14 \text{ minutes}$$

Cette autonomie est calculée sur la base de la puissance maximale des deux moteurs, qui n'est pas maintenue en continu. La consommation réelle est inférieure et correspond à la puissance nécessaire en régime de croisière.

En régime de croisière à 3 m/s, la puissance totale nécessaire pour les deux moteurs a été estimée à :

$$P_{\text{moteur total}} = 3415 \text{ W} \quad \text{soit environ } 1708 \text{ W par moteur}$$

En considérant la tension maximale admissible des moteurs brushless (23 V), le courant absorbé par chaque moteur devient :

$$I_{\text{moteur}} = \frac{1708}{23} \approx 74,3 \text{ A}$$

et la consommation totale du système est alors :

$$I_{\text{total}} = 2 \times 74,3 \approx 148,6 \text{ A}$$

En utilisant deux batteries de 25 Ah en parallèle (soit une capacité totale de 50 Ah à 24 V), l'autonomie estimée est :

$$t = \frac{50}{148,6} \approx 0,336 \text{ heures} = 20,2 \text{ minutes}$$

Cette autonomie correspond à une vitesse de croisière de 3 m/s avec un effort soutenu.

Synthèse des caractéristiques techniques du drone

À l'issue de la phase de conception, il est essentiel de regrouper les principales données techniques du drone afin de fournir une vue d'ensemble claire et exploitable par les utilisateurs, les opérateurs ou les responsables d'exploitation. Le tableau ci-dessous récapitule l'ensemble des caractéristiques clés du prototype développé dans ce projet.

TABLE 2.1 – Caractéristiques techniques du drone de sauvetage aquatique

Caractéristique	Valeur / Description
Nom du modèle	DroneV4 Aquatique
Type	Drone de surface autonome pour sauvetage en mer
Dimensions hors tout	$1100 \times 900 \times 135\text{mm} (L \times l \times H)$
Volume total	60 litres
Poids à vide	13.8 kg
Limite d'immersion	36 kg (immersion complète)
Matériau de la coque	Composite fibre de verre / époxy
Structure	Stratifié monolithique ou sandwich avec âme légère
Vitesse maximale	3.5 m/s
Vitesse de remorquage optimale	2.0 – 2.5 m/s
Autonomie à 3 m/s	20 min (3.6 km, rayon opérationnel 1.5 km avec marge)
Propulsion	Double waterjet Ø 40 mm, 120 N chacun (total 240 N)
Poussée totale disponible	240 N
Stabilité inertielle	GM mesuré : 3.49 m
Système de contrôle	Télécommande radio / Navigation autonome avec GPS
Système de navigation	GPS, retour automatique, boussole
Étanchéité	IP68 Résistant à l'immersion
Capteurs intégrés	Température, batterie, capteurs inertiels
Éclairage	Feux LED haute visibilité (nuit)
Temps de recharge	2 h (batterie lithium 6S haute capacité)
Utilisation prévue	Sauvetage côtier

Chapitre 3

Étude structurelle de la coque de sauvetage aquatique

Généralités sur les matériaux composites

1. Introduction générale

Les matériaux composites occupent une place croissante dans l'ingénierie moderne en raison de leur capacité à combiner légèreté, rigidité et performance mécanique. Ils sont largement utilisés dans les secteurs aéronautique, automobile, ferroviaire, et naval, ainsi que dans les équipements sportifs ou les drones. Un matériau composite est constitué de deux phases principales :

- une **matrice**, généralement polymère, assurant la cohésion de l'ensemble ;
- un **renfort**, sous forme de fibres continues ou discontinues, apportant la résistance mécanique.

Leur synergie permet d'obtenir des matériaux aux performances supérieures à celles de leurs constituants pris séparément [12].

2. Typologie des composites

Les matériaux composites se déclinent en plusieurs catégories selon la nature du renfort, de la matrice, et l'architecture globale de la structure. Leur classification repose principalement sur le type de fibres utilisées, leur orientation dans la matrice, et la présence éventuelle d'une âme dans les structures multicouches.

2.1 Composites à fibres continues unidirectionnelles (UD)

Ces composites sont constitués de fibres toutes orientées dans une même direction, généralement alignées avec les efforts principaux. Ils offrent une résistance et une rigidité exceptionnelles dans l'axe des fibres, mais sont très anisotropes : leurs propriétés mécaniques dans les directions transverses (perpendiculaires aux fibres) sont nettement plus faibles. Ce type de renforcement est souvent utilisé dans des structures où les contraintes sont bien connues et unidirectionnelles, comme les longerons d'ailerons ou les poutres.

2.2 Composites tissés (woven)

Dans les composites tissés, les fibres sont entrecroisées selon un motif régulier, souvent à $0^\circ/90^\circ$, mais aussi parfois en sergé ou satin. Cette architecture confère une meilleure stabilité dimensionnelle et une résistance plus équilibrée dans le plan du tissu. Elle facilite également la mise en œuvre dans des formes complexes, réduisant les risques de délaminage et les concentrations de contraintes. Les tissés sont donc particulièrement adaptés aux structures navales, où les sollicitations multidirectionnelles sont fréquentes.

2.3 Composites à matrice polymère (PMC)

Les composites à matrice polymère (Polymer Matrix Composites) représentent la majorité des applications actuelles dans l'aéronautique, l'automobile, le nautisme et le sport. Ils associent des fibres de renfort (verre, carbone, aramide) à une matrice thermodurcissable (époxy, polyester, vinylester) ou thermoplastique. La matrice assure la cohésion de l'ensemble, la répartition des charges et la protection des fibres, tandis que les fibres assurent la résistance mécanique.

2.4 Structures sandwich

Les structures sandwich sont constituées de deux peaux minces en matériau composite (souvent en fibres tissées) qui enserrant une âme légère, typiquement en mousse polymère rigide ou en nid d'abeille. Cette configuration offre un excellent compromis entre rigidité et légèreté. Le principe est comparable à une poutre en I, où les peaux supportent les efforts de traction et de compression, tandis que l'âme reprend les efforts de cisaillement. Elles sont couramment utilisées dans les planchers d'aéronefs, les coques de bateaux et les drones marins ou aériens.

Application dans ce travail : Le présent projet s'appuie sur un composite tissé à base de fibre de verre imprégnée de résine époxy, utilisé à la fois en version monolithique (plaque pleine) et en structure sandwich avec différentes âmes (mousse PVC, PET, etc.). Ce choix repose sur le bon compromis entre coût, résistance mécanique, facilité de mise en œuvre, et compatibilité avec l'environnement marin.

3. Propriétés mécaniques des composites

Les matériaux composites présentent un comportement mécanique **anisotrope**, c'est-à-dire dépendant de la direction de sollicitation. Pour les composites orthotropes (tissus à trame et chaîne), trois directions principales sont définies :

- 1 : direction des fibres longitudinales (warp) ;
- 2 : direction transverse (weft) ;
- 3 : direction d'épaisseur.

Les propriétés mécaniques de base incluent :

- Modules d'Young : E_1 , E_2 , E_3 ;
- Modules de cisaillement : G_{12} , G_{13} , G_{23} ;
- Coefficients de Poisson : ν_{12} , ν_{13} , ν_{23} .

Les propriétés dépendent fortement :

- de l'orientation des fibres,
- du taux de fibre (rapport fibre/résine),
- du procédé de fabrication.

4. Comportement mécanique et modélisation

4.1 Loi de Hooke généralisée

Pour un matériau orthotrope, la loi de Hooke s'écrit sous forme tensorielle :

$$\{\sigma\} = [Q] \cdot \{\varepsilon\}$$

où $[Q]$ est la matrice de rigidité constituée de neuf constantes indépendantes (dans le cas général 3D), reliant les contraintes aux déformations.

4.2 Cas de la contrainte plane (coques minces)

Dans les coques minces, on suppose $\sigma_3 = 0$ (contrainte négligeable dans l'épaisseur). Le système se réduit à :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix}$$

Les coefficients Q_{ij} sont obtenus à partir des modules E_i , G_{ij} , et ν_{ij} .

4.3 Stratifiés multicouches : matrices $[A]$, $[B]$, $[D]$

Dans le cas d'un stratifié, chaque couche peut avoir une orientation propre (0°, 45°, 90°). Le comportement global est exprimé par :

$$\begin{aligned} [A] &= \int_{-h/2}^{h/2} Q(z) dz && \text{(rigidité membranaire)} \\ [B] &= \int_{-h/2}^{h/2} z Q(z) dz && \text{(couplage extension/flexion)} \\ [D] &= \int_{-h/2}^{h/2} z^2 Q(z) dz && \text{(rigidité en flexion)} \end{aligned}$$

Ces matrices sont intégrées dans les éléments `shell` d'ansys pour simuler les stratifiés. Le couplage $[B]$ disparaît si le stratifié est symétrique.

4.2 Comportement élastique orthotrope

Un matériau orthotrope possède trois plans de symétrie perpendiculaires. Son comportement mécanique est régi par une forme généralisée de la loi de Hooke reliant les contraintes $\{\sigma\}$ et les déformations $\{\varepsilon\}$:

$$\{\sigma\} = [Q] \cdot \{\varepsilon\} \quad \text{ou} \quad \{\varepsilon\} = [S] \cdot \{\sigma\}$$

où $[Q]$ est la matrice de rigidité et $[S]$ la matrice de souplesse. Pour un matériau orthotrope 3D, ces matrices sont de taille 6×6 .

4.3 Hypothèse de contrainte plane (coques minces)

Dans le cas des structures minces (ex. : coques, plaques), on adopte l'hypothèse de contrainte plane**, c'est-à-dire :

$$\sigma_3 = \tau_{13} = \tau_{23} = 0$$

Cela permet de réduire le modèle à un comportement en deux dimensions (axes 1 et 2), dans le plan moyen du stratifié. On travaille alors avec les vecteurs réduits :

$$\{\sigma\}_{2D} = \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix}, \quad \{\varepsilon\}_{2D} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix}$$

4.4 Matrice de rigidité locale $[Q]$ d'une couche

La matrice $[Q]$ dans le repère local de la couche (orientée selon les fibres) est définie par les constantes élastiques :

$$\begin{aligned} Q_{11} &= \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\ Q_{22} &= \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\ Q_{12} &= \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\ Q_{66} &= G_{12} \end{aligned}$$

Avec la relation de réciprocité : $\nu_{12}/E_1 = \nu_{21}/E_2$

Ainsi, la matrice $\mathbf{Q}$ (en contrainte plane) est :

$$[Q] = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix}$$

4.5 Transformation dans le repère global

Chaque couche peut être orientée selon un angle θ par rapport à la direction globale du stratifié. Il faut alors transformer la matrice $[Q]$ locale en une matrice $[\bar{Q}]$ globale à l'aide de la matrice de transformation $[T]$:

$$[\bar{Q}] = T^{-1}[Q]T^{-T}$$

En pratique, on utilise les équations analytiques issues de la théorie classique des stratifiés (CLT), avec :

$$[\bar{Q}] = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}$$

Les coefficients dépendent de Q_{ij} et des fonctions trigonométriques de θ (détails en annexe si nécessaire).

—

4.6 Calcul des matrices $[A]$, $[B]$, $[D]$ du stratifié

Un stratifié multicouche est modélisé par l'assemblage des rigidités individuelles pondérées par l'épaisseur de chaque pli. On calcule :

$$\begin{aligned} [A] &= \sum_{k=1}^n [\bar{Q}]_k (z_k - z_{k-1}) \\ [B] &= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n [\bar{Q}]_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \\ [D] &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n [\bar{Q}]_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \end{aligned}$$

où z_k est la coordonnée en épaisseur de la couche k , avec $z = 0$ au milieu du stratifié. Les matrices $[A]$, $[B]$, $[D]$ sont de taille 3×3 .

- $[A]$: rigidité membranaire (traction dans le plan) - $[B]$: couplage flexion/extension (nul si stratifié symétrique) - $[D]$: rigidité en flexion

La relation finale liant les efforts/moments aux déformations est :

$$\begin{Bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_{12} \\ M_1 \\ M_2 \\ M_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_1^0 \\ \varepsilon_2^0 \\ \gamma_{12}^0 \\ \kappa_1 \\ \kappa_2 \\ \kappa_{12} \end{Bmatrix}$$

avec : - N_i : efforts normaux dans le plan, - M_i : moments fléchissants, - ε_i^0 : déformations au milieu du stratifié, - κ_i : courbures.

—

—

4.8 Critères de rupture

Les composites ne répondent pas au critère de Von Mises. On utilise :

- le **critère de contrainte maximale**,
- le **critère de Tsai-Hill** :

$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{1,\text{lim}}}\right)^2 - \frac{\sigma_1\sigma_2}{\sigma_{1,\text{lim}}^2} + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{2,\text{lim}}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{\tau_{12,\text{lim}}}\right)^2 \leq 1$$

- le **critère de Hashin**, pour différencier la rupture fibre/matrice.

5. Logique de conception des structures composites

Les composites offrent une grande liberté de conception (orientation des plis, empilement asymétrique, matériaux hybrides), mais leur conception nécessite :

- une bonne connaissance des propriétés directionnelles ;
- une vérification des contraintes interlaminaires (délaminage) ;
- une optimisation de l'empilement pour éviter les couplages indésirables.

La simulation par éléments finis devient alors indispensable.

6. Application aux structures navales et drones aquatiques

En environnement marin, les composites sont largement utilisés pour :

- les coques de bateaux et voiliers ;
- les panneaux de ponts et de cabines ;
- les drones de surface ou sous-marins (structure portante, capots) [13].

Leur faible poids, leur résistance à la corrosion et leur formabilité les rendent idéaux pour les coques de drones aquatiques. Cependant, l'environnement marin impose certaines contraintes :

- absorption d'humidité et dégradation à long terme,
- fatigue en flexion due aux vagues,
- vieillissement UV si exposé en surface.

Ces aspects doivent être intégrés dans la sélection des matériaux, la conception et la protection des surfaces.

7. Récapitulatif

Ce cadre théorique fournit les bases nécessaires à la compréhension des comportements mécaniques des composites utilisés dans la structure du drone. Il prépare ainsi à l'analyse expérimentale et numérique (modélisation sous Ansys) développée dans les chapitres suivants.

3.1 Introduction

Après avoir posé les bases théoriques relatives aux matériaux composites et à leur comportement mécanique dans le contexte naval, cette section présente l'étude structurelle appliquée à la conception du drone aquatique de sauvetage. L'objectif est de garantir à la fois la robustesse mécanique, la résistance aux contraintes marines et la légèreté indispensable à l'efficacité énergétique du système. Cette démarche repose sur une double approche : d'une part, une caractérisation expérimentale des matériaux retenus, et d'autre part, une modélisation par éléments finis permettant de simuler le comportement global de la structure sous sollicitations mécaniques.

3.2 Choix du matériaux utilisés

3.2.1 Peaux en fibre de verre

À la suite de la phase théorique, un travail de sélection et de caractérisation expérimentale a été mené pour identifier un matériau composite adapté à la fabrication de la coque du drone. En concertation avec les spécialistes du Centre de Recherche en Technologies Industrielles (CRTI), le choix s'est porté sur une fibre de verre tissée d'un grammage de 450 g/m^2 . Cette sélection repose sur plusieurs arguments :

- La bonne disponibilité locale du matériau, facilitant son approvisionnement et sa mise en œuvre ;
- Ses propriétés mécaniques validées par de nombreuses publications scientifiques ;
- Sa compatibilité avec les environnements marins grâce à une excellente tenue à la corrosion.

Deux configurations de stratifiés ont été réalisées afin de comparer leur comportement :

- Une plaque de cinq couches de fibre de verre ;
- Une plaque de sept couches de fibre de verre.

Ces configurations ont servi à la fabrication des éprouvettes pour les essais de traction et de flexion. Elles ont également permis de définir une couche équivalente dans la modélisation numérique par éléments finis.

3.2.2 Fibre de verre comme matériau composite principal

La fibre de verre renforcée (GFRP) est aujourd'hui l'un des matériaux composites les plus utilisés dans le domaine maritime. Elle présente un excellent compromis entre performance mécanique, légèreté et coût, ce qui la rend idéale pour les structures de drones aquatiques. Parmi ses principaux avantages, on peut citer :

- Un rapport résistance/poids supérieur à celui de nombreux alliages métalliques ;
- Une bonne résistance à la corrosion en milieu salin, sans traitement de surface ;
- Une facilité de mise en œuvre avec des procédés tels que la stratification manuelle ou l'infusion sous vide ;
- Une compatibilité avec les structures sandwich pour maximiser la rigidité en flexion à faible masse.

Ces caractéristiques en font un choix de premier ordre pour la conception de drones marins autonomes, où la durabilité, la stabilité et l'économie d'énergie sont des critères essentiels [14–18].

3.2.3 Matériaux de noyau pour structures sandwich

Dans le but d'augmenter la rigidité des parois tout en minimisant la masse, plusieurs matériaux de noyau ont été testés pour la fabrication de structures sandwich. Ces noyaux ont été insérés entre deux peaux de fibre de verre. Deux configurations ont été expérimentées :

- Une fine couche de polyester extrudé (XPS), offrant une bonne résilience mécanique ;
- Une fine couche de polyester standard, présentant un bon compromis entre rigidité et flexibilité.

Chaque configuration a été évaluée expérimentalement en termes de comportement en flexion, dans le but d'identifier la meilleure combinaison pour la coque du drone. Ces essais ont permis de valider les hypothèses retenues pour la modélisation numérique des structures sandwich dans les simulations ansys.

3.3 Méthodologie expérimentale

La caractérisation mécanique du matériau composite utilisé pour la coque du drone aquatique a nécessité la réalisation d'essais normalisés sur des éprouvettes fabriquées en interne. Cette démarche a permis d'obtenir les constantes mécaniques nécessaires à la modélisation dans ansys. La méthodologie suivie comprend la fabrication des plaques de matériau, la découpe des éprouvettes, et la réalisation des essais de traction et de flexion selon des normes techniques reconnues.

3.3.1 Fabrication des plaques composites

Le matériau testé est un composite à matrice époxy renforcé par un tissu de fibre de verre tissée. La fabrication des plaques s'est déroulée selon le procédé de **stratification manuelle sous vide** [12], en plusieurs étapes :

1. Découpe des feuilles de tissu à partir d'un rouleau de fibre de verre de grammage 450 g/m^2 , selon les dimensions souhaitées pour les futures plaques.
2. Imprégnation manuelle de chaque couche avec de la résine époxy à l'aide d'un rouleau applicateur, en veillant à bien répartir la résine sans excès.
3. Superposition des couches selon l'empilement souhaité, jusqu'à obtention de l'épaisseur finale.
4. Application d'un tissu de drapage, d'un film de pelage, d'un filet de drainage et d'un feutre absorbant.
5. Mise sous vide de l'ensemble à l'aide d'une pompe et d'un sac étanche pendant 6 heures, afin d'assurer la compaction, l'évacuation de l'air et une bonne répartition de la résine [19].
6. Démoulage et post-durcissement à température ambiante pendant 48 heures.

Documentation photographique du processus de fabrication

Afin d'illustrer concrètement les étapes de la fabrication des plaques composites destinées à la découpe des éprouvettes, une série de photographies a été prise durant les séances au laboratoire du CRTI. Cette documentation visuelle permet de mieux appréhender les différentes phases du procédé de stratification sous vide appliqué, ainsi que les conditions réelles de mise en œuvre.



FIGURE 3.1 – Imprégnation manuelle de chaque couche avec de la résine époxy

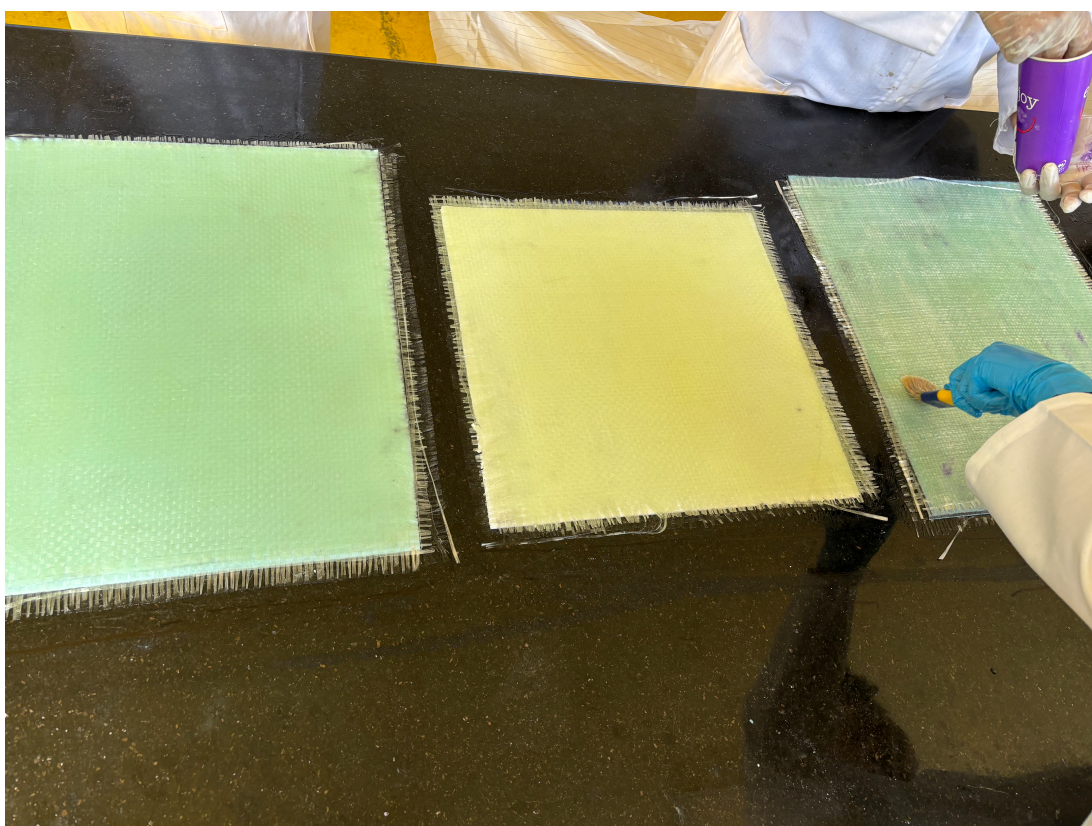


FIGURE 3.2 – Superposition des couches selon l'empilement souhaité, jusqu'à obtention de l'épaisseur finale.



FIGURE 3.3 – Application d'un filet de drainage .

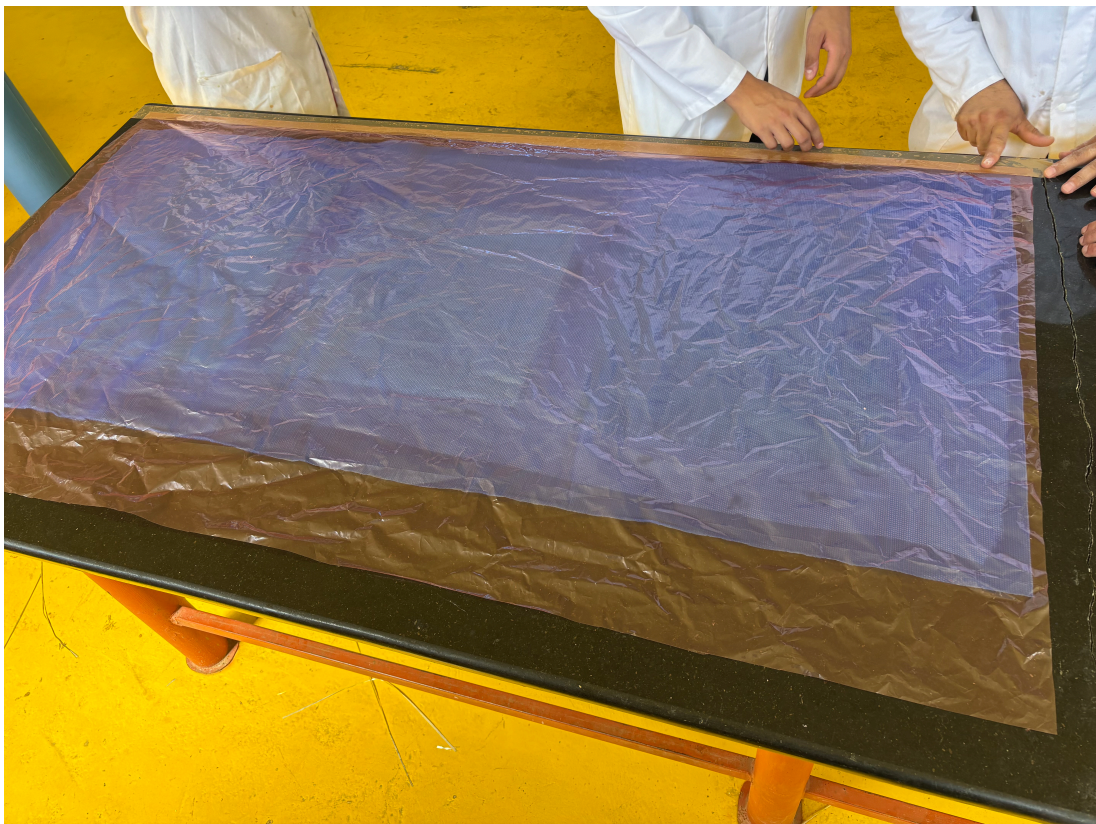


FIGURE 3.4 – application un film de pelage.



FIGURE 3.5 – Mise sous vide de l'ensemble à l'aide d'une pompe et d'un sac étanche.



FIGURE 3.6 – Découpe précise des éprouvettes à l'aide d'une machine CNC à commande numérique.

L'ajout de ces photos dans le mémoire permet non seulement d'apporter un support visuel à la des-

cription méthodologique, mais également de démontrer la rigueur expérimentale et les conditions de mise en œuvre des éprouvettes testées. Elles constituent ainsi une trace tangible du processus suivi, renforçant la validité des résultats expérimentaux obtenus par la suite.

3.3.2 Préparation des éprouvettes

Après durcissement complet, les plaques obtenues ont été découpées pour obtenir les éprouvettes destinées aux essais mécaniques. Bien que les normes **ISO 527-4** (traction) et **ISO 14125** (flexion) aient été prises comme références, des ajustements ont été apportés afin de s'adapter aux capacités de la machine de test disponible et à l'épaisseur des plaques [20].

Les contours des éprouvettes ont été modélisés dans un fichier **.DXF**, puis usinés à l'aide d'une machine CNC, ce qui a permis d'obtenir des bords nets et des dimensions précises. Le respect de la géométrie des éprouvettes est essentiel pour garantir la reproductibilité des essais et éviter les amorces de rupture prématurées.

3.3.3 Réalisation des essais mécaniques

Les essais ont été réalisés au sein du **Centre de Recherche en Technologies Industrielles (CRTI) de Chéraga**, dans le respect des protocoles expérimentaux standards.

3.3.3.1 Essai de traction

Les essais de traction uniaxiale ont été réalisés sur des éprouvettes d'environ 175 mm de longueur, avec une section utile réduite à 10 mm de largeur pour favoriser une rupture dans la zone centrale. La longueur de jauge utilisée est de 60 mm.

Chaque éprouvette a été placée entre deux mors de la machine d'essai, et la force de traction a été appliquée progressivement jusqu'à la rupture. Le déplacement a été enregistré en continu à l'aide d'un extensomètre ou d'un capteur de déplacement intégré. La vitesse d'essai recommandée par la norme ISO 527-4 est de 2 mm/min [21].

Les résultats ont permis d'obtenir :

- Le module d'Young longitudinal E_1 (dans la direction des fibres).
- La contrainte maximale à la rupture.
- L'allongement à la rupture.

3.3.3.2 Essai de flexion trois points

Les essais de flexion ont été menés selon le schéma classique à trois appuis, en suivant la norme **ISO 14125** [22]. Les éprouvettes, de section rectangulaire, ont été posées sur deux appuis fixes, et une charge centrale a été appliquée à l'aide d'un vérin motorisé.

Les dimensions typiques étaient :

- Longueur : 100 mm
- Largeur : 15 mm
- Portée entre appuis : 80 mm

La charge a été appliquée à une vitesse de 2 mm/min, et la flèche centrale a été mesurée en temps réel. Ces essais ont permis d'obtenir :

- Le module d'élasticité en flexion.
- La contrainte maximale en flexion.
- Le comportement global (linéaire ou non, ductilité, rupture fragile).

Les éprouvettes testées ont été issues de la même plaque que celles utilisées pour déterminer les propriétés mécaniques entrées dans Ansys. Cette cohérence entre expérimentation et simulation garantit la représentativité des résultats obtenus.

3.4 Résultats expérimentaux

Les résultats des essais sont présentés sous forme de tableaux et de courbes contrainte-déformation. Une comparaison entre les différents types d'essais permet d'établir les propriétés mécaniques globales du matériau composite testé.

- Les courbes de flexion permettent de valider le comportement du matériau sous sollicitation en flexion, en particulier pour les zones courbes de la coque du drone.

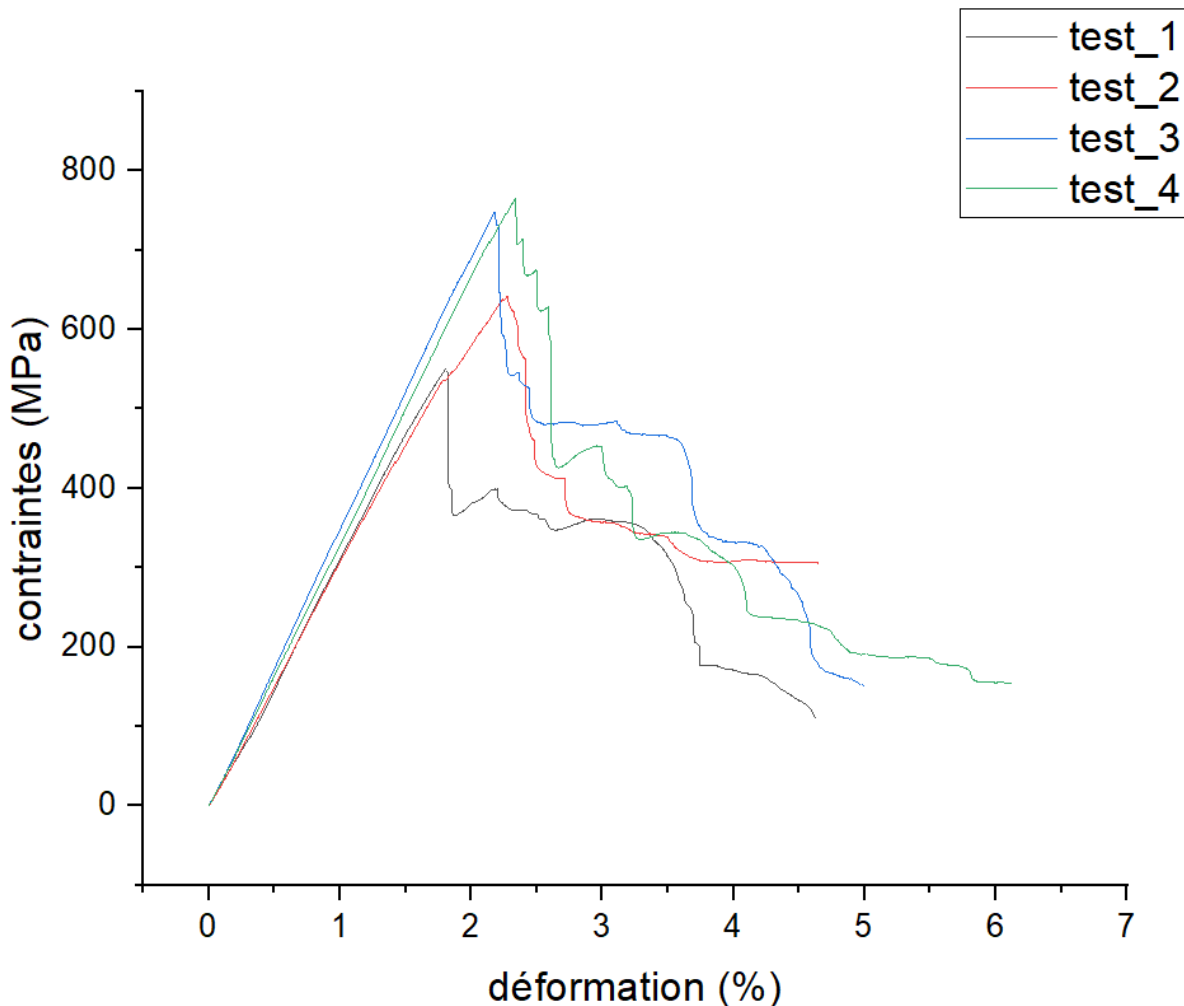


FIGURE 3.7 – Courbes de flexion pour la fibre de verre stratifiée 5 couches (test_1 à test_4)

TABLE 3.1 – Résultats des essais de flexion

Moyenne : 30,4GPa

Cette méthode est cohérente avec l'approche par **couche équivalente homogène**, largement utilisée dans les modélisations par éléments finis de structures composites complexes [23].

3.4.1 Paramètres de simulation

Dans le cadre de l'étude structurelle du drone aquatique, une simulation par éléments finis a été réalisée à l'aide du logiciel **ansys**. Cette simulation vise à analyser le comportement mécanique de la coque composite soumise à un effort vertical équivalent au poids d'un corps humain, dans un contexte de sauvetage. L'approche suivie combine rigueur numérique, fidélité physique et validation expérimentale.

3.4.2 Préparation de la géométrie

La géométrie 3D du drone a été modélisée dans **SolidWorks**, en tenant compte des contraintes fonctionnelles (flottabilité, compartiments internes, interfaces mécaniques). Elle a ensuite été exportée au format **.STEP**, format compatible avec ANSYS et préservant fidèlement les détails de la conception.

Une fois importée dans Ansys, la géométrie a été vérifiée afin d'éliminer les défauts susceptibles de nuire à la qualité du maillage (entités parasites, discontinuités, géométries trop fines). Cette étape de nettoyage est essentielle pour garantir la stabilité numérique et permettre un maillage fiable sur l'ensemble de la coque.

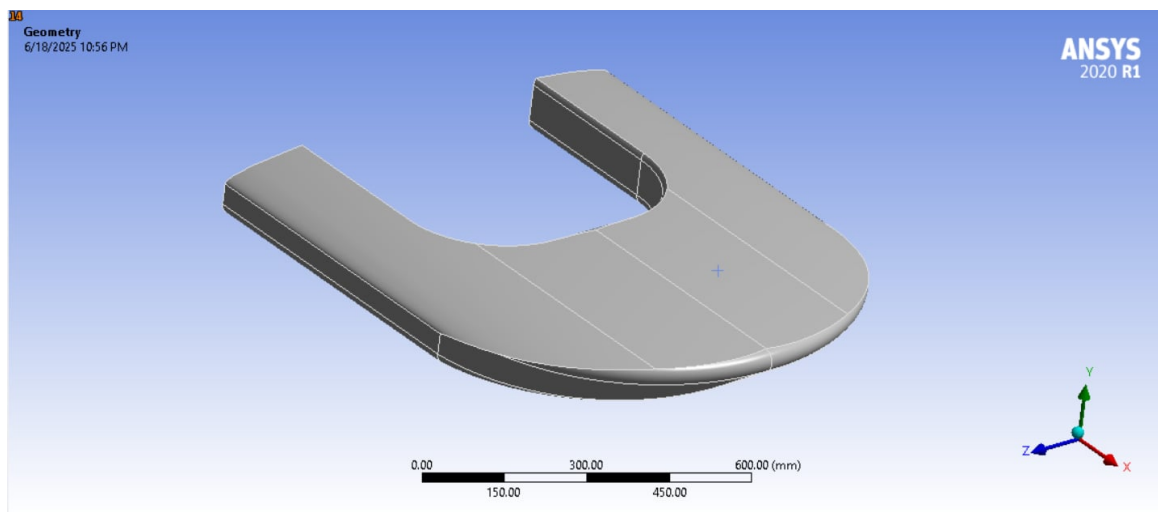


FIGURE 3.8 – Géométrie 3D du drone aquatique importée depuis SolidWorks dans ansys pour l'analyse structurelle..

3.4.3 Définition des propriétés mécaniques du matériau

La coque est constituée de **fibre de verre tissée** imprégnée de résine époxy, mise en œuvre selon un procédé de stratification sous vide. Plutôt que de modéliser chaque pli individuellement, ce qui impliquerait une grande complexité géométrique, une approche par **couche équivalente orthotrope** a été retenue.

Les propriétés mécaniques de cette couche équivalente ont été obtenues à partir d'essais de traction et de flexion réalisés sur des plaques moulées dans les mêmes conditions que la coque. L'identification des constantes mécaniques a permis de caractériser un comportement orthotrope moyen.

Dans le cadre de cette simulation, les paramètres retenus sont ceux extraits des essais de flexion, et non de traction. Cette décision repose sur une analyse du mode de sollicitation réel du drone. En effet, lorsqu'il est exposé à une charge verticale comme lors du soutien d'une personne en mer, la structure subit principalement des efforts de flexion, notamment dans les zones horizontales et les zones courbes de la coque. Les modules mesurés en flexion traduisent donc de manière plus représentative la réponse mécanique globale attendue en service ¹.

Les valeurs utilisées dans ansys sont les suivantes :

- Module d'Young longitudinal E_1 : 29.3 GPa
- Module d'Young transversal E_2 : 29.3 GPa
- Module de cisaillement G_{12} : 4.5 GPa
- Coefficient de Poisson ν_{12} : 0.3

... les modules de cisaillement ($G_{12} = 4.5$ GPa) et de Poisson ($\nu_{12} = 0,3$) ont été adoptés selon les plages typiques rapportées pour les composites verre/époxy dans la littérature technique (voir annexe 5.2.1).

Ces paramètres ont été intégrés dans ANSYS via la définition d'un matériau orthotrope en utilisant les constantes de l'ingénieur. Le modèle de matériau a ensuite été assigné à toute la coque, supposée uniforme dans ses propriétés mécaniques.

3.4.4 Conditions aux limites et chargement appliqué

La simulation vise à reproduire un scénario typique de sauvetage, dans lequel le drone supporte la charge d'un nageur adulte s'appuyant sur sa coque. Le chargement est appliqué sous forme d'une pression répartie verticalement sur une zone supérieure centrale du drone.

Les conditions aux limites imposées sont les suivantes :

- **Déplacement vertical** ($U_2=0$) sur les surfaces internes de fixation du drone, représentant les liaisons avec les composants internes rigides.
- **Pression verticale descendante** équivalente à une force totale d'environ 686 N, appliquée sur une surface définie correspondant à la zone de contact du nageur.

Ces conditions permettent une représentation réaliste des efforts subis par la coque en fonctionnement.

1. Selon Daniel et Ishai, la rigidité en flexion est généralement utilisée dans les modèles de structures minces composites soumises à des charges réparties, telles que les coques de bateaux ou d'aéronefs [23].

3.4.5 Stratégie de maillage

Compte tenu de la géométrie complexe du drone (volumes courbes, transitions nettes, ouvertures), un maillage structuré n'était pas envisageable. Le choix s'est donc porté sur un **maillage tétraédrique**, généré automatiquement par Ansys.

Les éléments utilisés sont de type **SOLID185**, soit des éléments tétraédriques quadratiques à dix nœuds, qui offrent une meilleure précision dans les zones courbes et une convergence plus rapide.

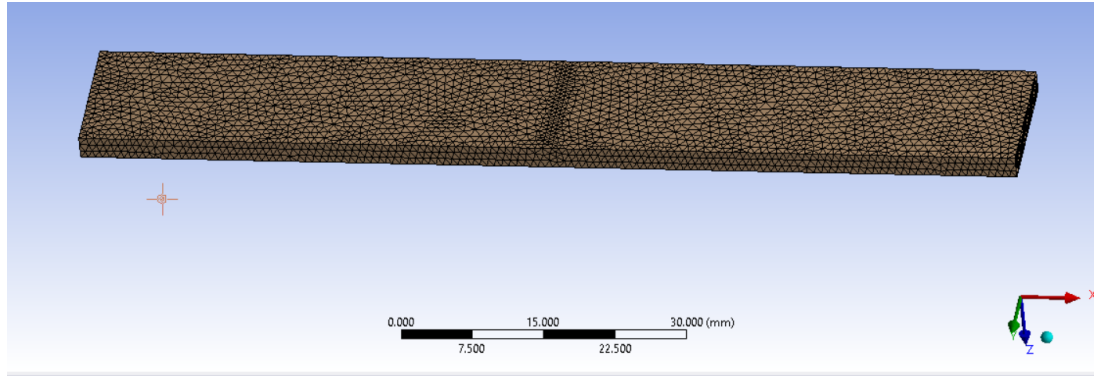


FIGURE 3.9 – Maillage global du modèle avec une taille d'élément de 1 mm.

3.4.6 Validation expérimentale du maillage

Avant d'appliquer cette stratégie au modèle global, une simulation a été réalisée sur une éprouvette de flexion, identique à celle testée en laboratoire. Le même type de maillage tétraédrique (éléments SOLID185) a été utilisé pour ce modèle réduit.

Afin de valider la taille d'élément retenue pour le maillage, une étude de convergence a été réalisée à travers plusieurs simulations représentant une traverse en flexion de 3 mm 4 mm et 5 mm. Les contraintes de Von Mises obtenues numériquement ont été comparées aux résultats expérimentaux issus des essais de flexion sur éprouvettes en composite stratifié. La taille d'élément a été progressivement réduite de 1.25 mm à 0.5 mm, et on a retenu le maillage de 1 mm cette dernière représente le meilleur compromis optimal entre précision et coût computationnel.

Les écarts relatifs entre les résultats numériques et expérimentaux sont restés inférieurs à **1%**, ce qui est conforme aux critères couramment admis dans la littérature scientifique pour la validation d'un maillage. [24].

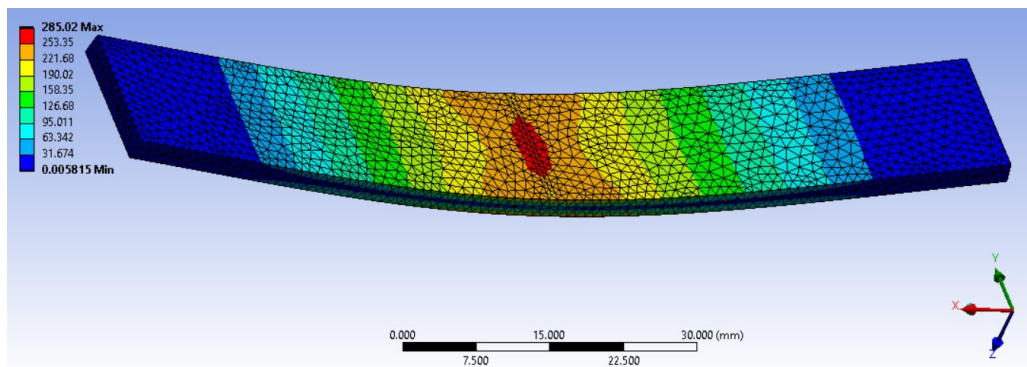


FIGURE 3.10 – Maillage initial avec des éléments grossiers

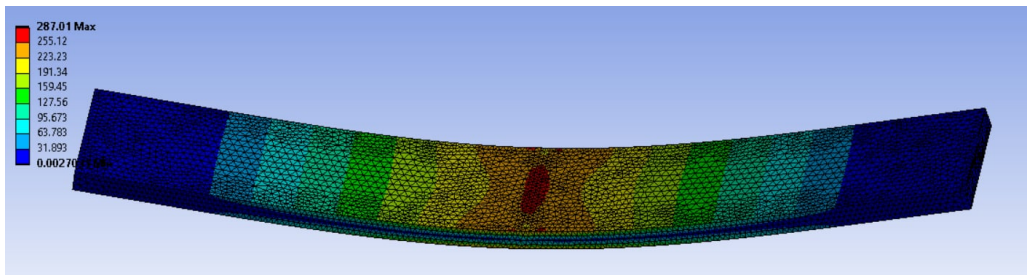


FIGURE 3.11 – Maillage intermédiaire avec une densité améliorée

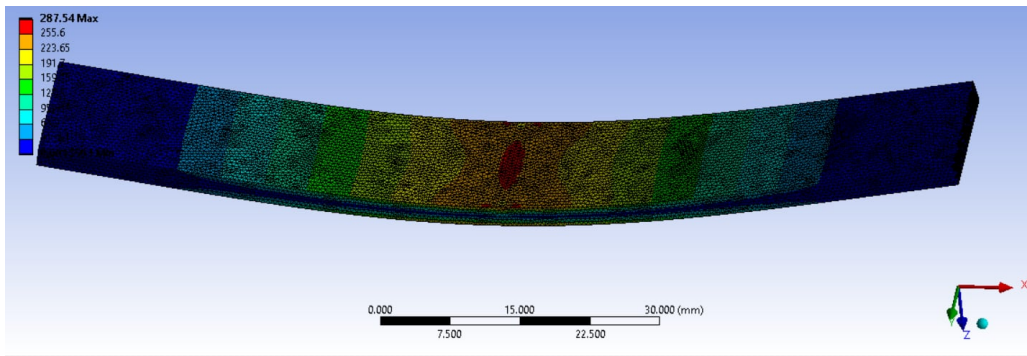


FIGURE 3.12 – Maillage fin montrant la convergence des contraintes

Les écarts relatifs entre les résultats numériques et expérimentaux sont restés inférieurs à 1%, ce qui est conforme aux critères couramment admis dans la littérature scientifique pour la validation d'un maillage. [24].

3.4.6.1 Validation numérique par comparaison avec l'expérimentation

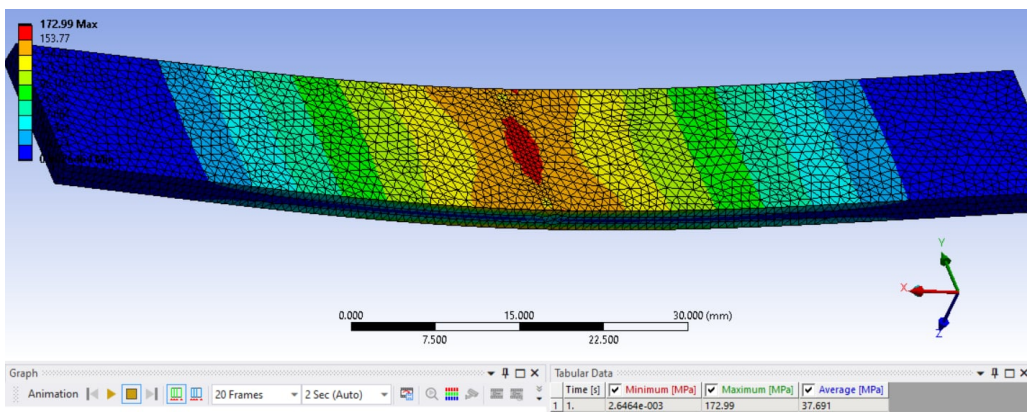


FIGURE 3.13 – Résultats de contrainte de von Mises - traverse de 3mm.

déplacement	déformation	contrainte
2.99082	0.70097	171.054
2.99426	0.70178	171.263
2.99743	0.70252	171.373
3.00088	0.70333	171.512
3.00414	0.70409	171.627
3.00754	0.70492	171.981
3.01084	0.70567	172.256

FIGURE 3.14 – Résultats obtenus par la machine de traction - traverse de 3mm.

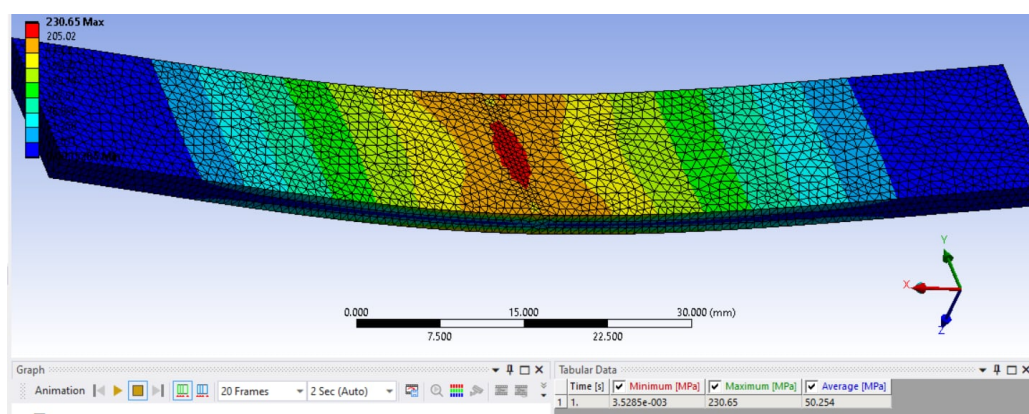


FIGURE 3.15 – Résultats de contrainte de von Mises - traverse de 4mm.

déplacement	déformation	contrainte
3.99077	0.93534	230.844
3.99408	0.93611	231.074
3.99752	0.93692	231.214
4.00074	0.93767	231.466
4.00423	0.93849	231.557
4.00794	0.93924	231.632
4.01094	0.94008	231.832

FIGURE 3.16 – Résultats obtenus par la machine de traction - traverse de 4mm.

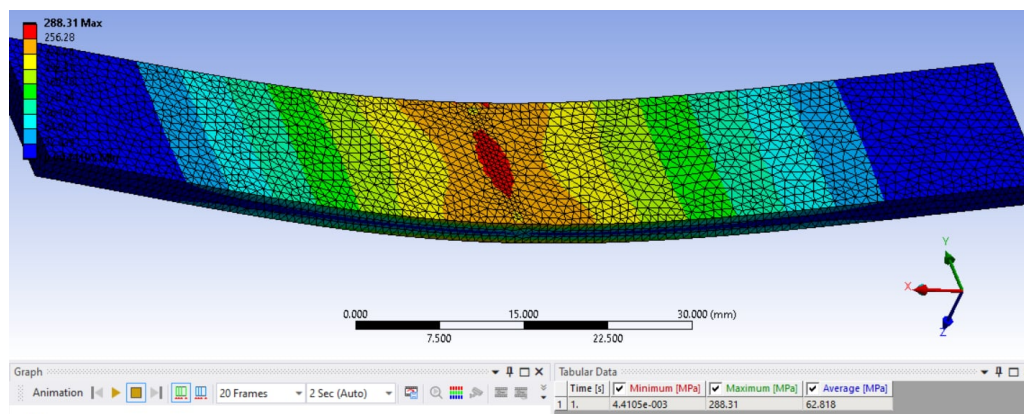


FIGURE 3.17 – Résultats de contrainte de von Mises - traverse de 5mm.

déplacement	déformation	contrainte
4.99077	1.16971	288.147
4.99398	1.17047	288.346
4.99748	1.17128	288.597
5.00069	1.17204	288.704
5.00409	1.17283	288.852
5.00735	1.1736	289.067
5.0107	1.17438	289.399

FIGURE 3.18 – Résultats obtenus par la machine de traction - traverse de 5mm.

Les résultats expérimentaux utilisés pour la validation des simulations numériques proviennent d'une campagne d'essais réels menée sur des éprouvettes composites, en flexion trois points. Les données brutes de ces essais sont sous forme de tableau issu des relevés machines. Ces résultats ont servi de base pour comparer les contraintes simulées avec les contraintes mesurées, en vue de valider le maillage final.

3.4.7 Post-traitement et analyse des résultats

L'analyse des résultats s'est focalisée sur :

- les contraintes équivalentes de **von Mises**, pour identifier les zones potentiellement critiques ;
- les **déplacements verticaux**, afin d'évaluer la déformation maximale sous charge ;
- les **réactions aux appuis**, pour vérifier la cohérence globale du système simulé.

Les contraintes maximales observées restent inférieures à la limite élastique du matériau équivalent, ce qui confirme la capacité de la coque à supporter les charges prévues dans le cadre d'un usage en conditions réelles.

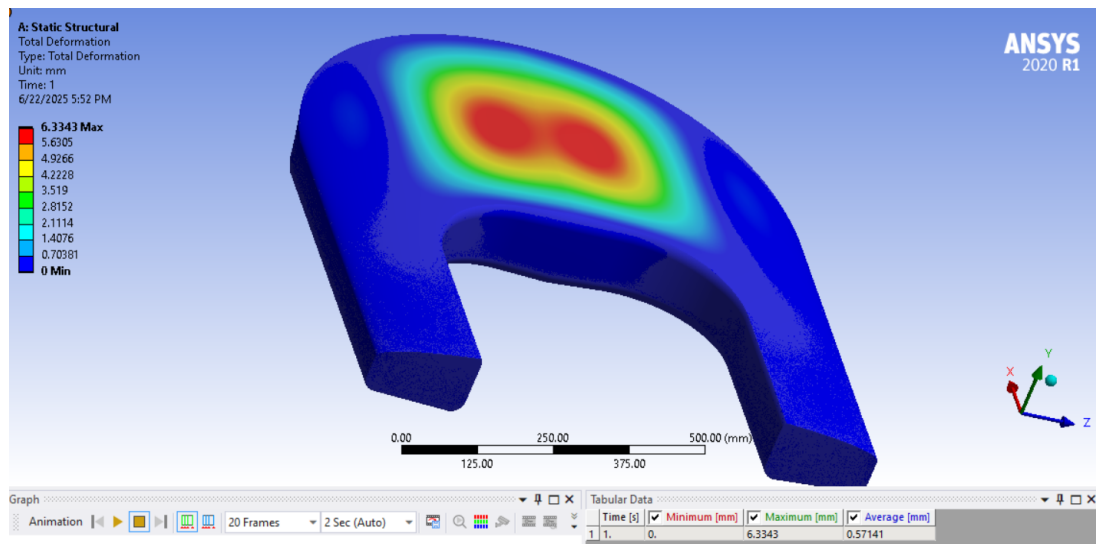


FIGURE 3.19 – Déplacement total (Total Deformation) sous une charge verticale valeur maximale : 6,33 mm

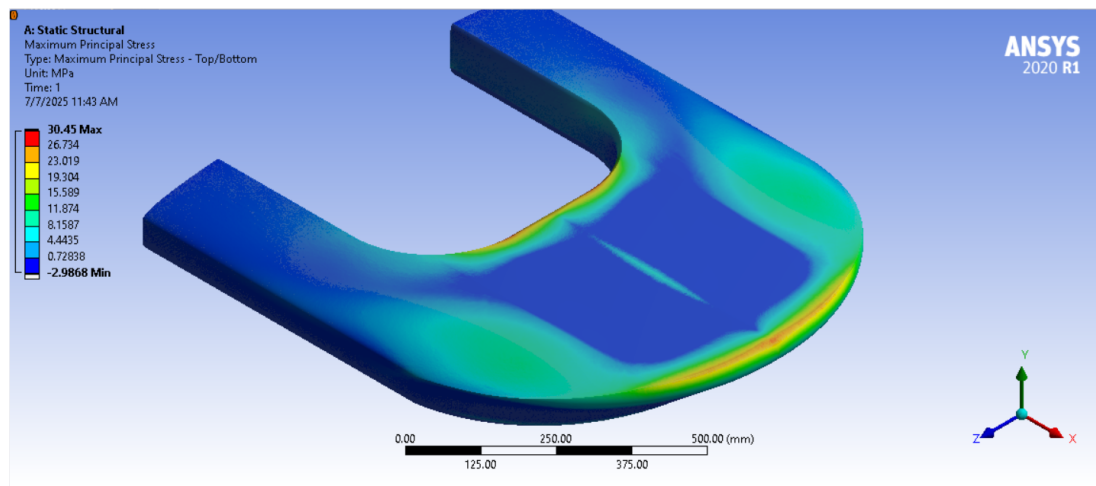


FIGURE 3.20 – Contrainte équivalente de Von Mises valeur maximale : 30,45 MPa

3.5 Bilan

L'étude structurale a permis de valider le choix des matériaux et de concevoir une structure suffisamment résistante et légère. Ces données serviront de base pour la fabrication du prototype final.

3.6 Étude expérimentale des matériaux composites

Dans la continuité des simulations structurelles précédemment présentées, il nous a paru essentiel d'étendre notre analyse par une étude expérimentale ciblée. En effet, si les modèles numériques permettent d'anticiper les comportements mécaniques globaux, ils reposent sur des hypothèses idéalisées et ne reflètent pas toujours les réalités de la fabrication. L'objectif ici est d'explorer différentes alternatives matérielles, dans la perspective d'optimiser la structure du drone aquatique pour des réalisations futures. Ces essais ont ainsi pour ambition d'identifier, à travers des tests normalisés, les combinaisons matériaux/noyaux les plus prometteuses en termes de performance mécanique, tout en tenant compte des contraintes de mise en œuvre.

3.6.1 Présentation des éprouvettes testées

Trois catégories de matériaux ont été soumises à des essais mécaniques :

- **Une fibre de verre stratifiée en 7 couches**, fabriquée à partir de tissu tissé avec une résine époxy. Ce matériau sert de référence dans cette étude.
- **Des composites sandwichs avec noyau en mousse XPS**, testés avec différentes orientations de rainurage pour améliorer la diffusion de la résine.
- **Des composites sandwichs avec noyau en polyester** , également testés en flexion et traction.

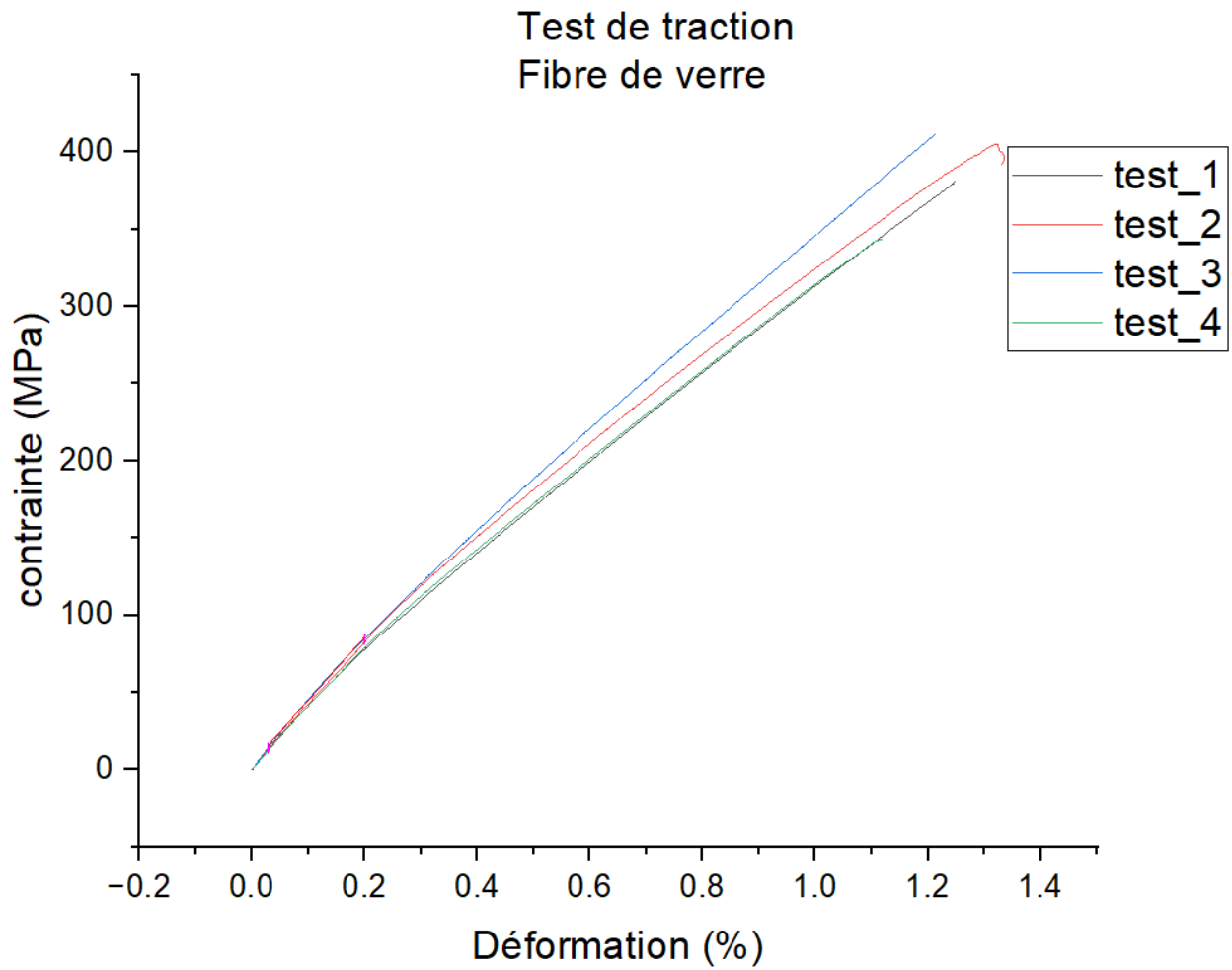


FIGURE 3.21 – Courbes de traction pour la fibre de verre stratifiée (test_1 à test_4)

Commentaire : Les quatre courbes montrent une très bonne cohérence avec une tendance linéaire jusqu'à rupture, confirmant le bon comportement élastique de la fibre de verre stratifiée. Les résultats sont homogènes, traduisant une fabrication maîtrisée et une bonne homogénéité du stratifié.

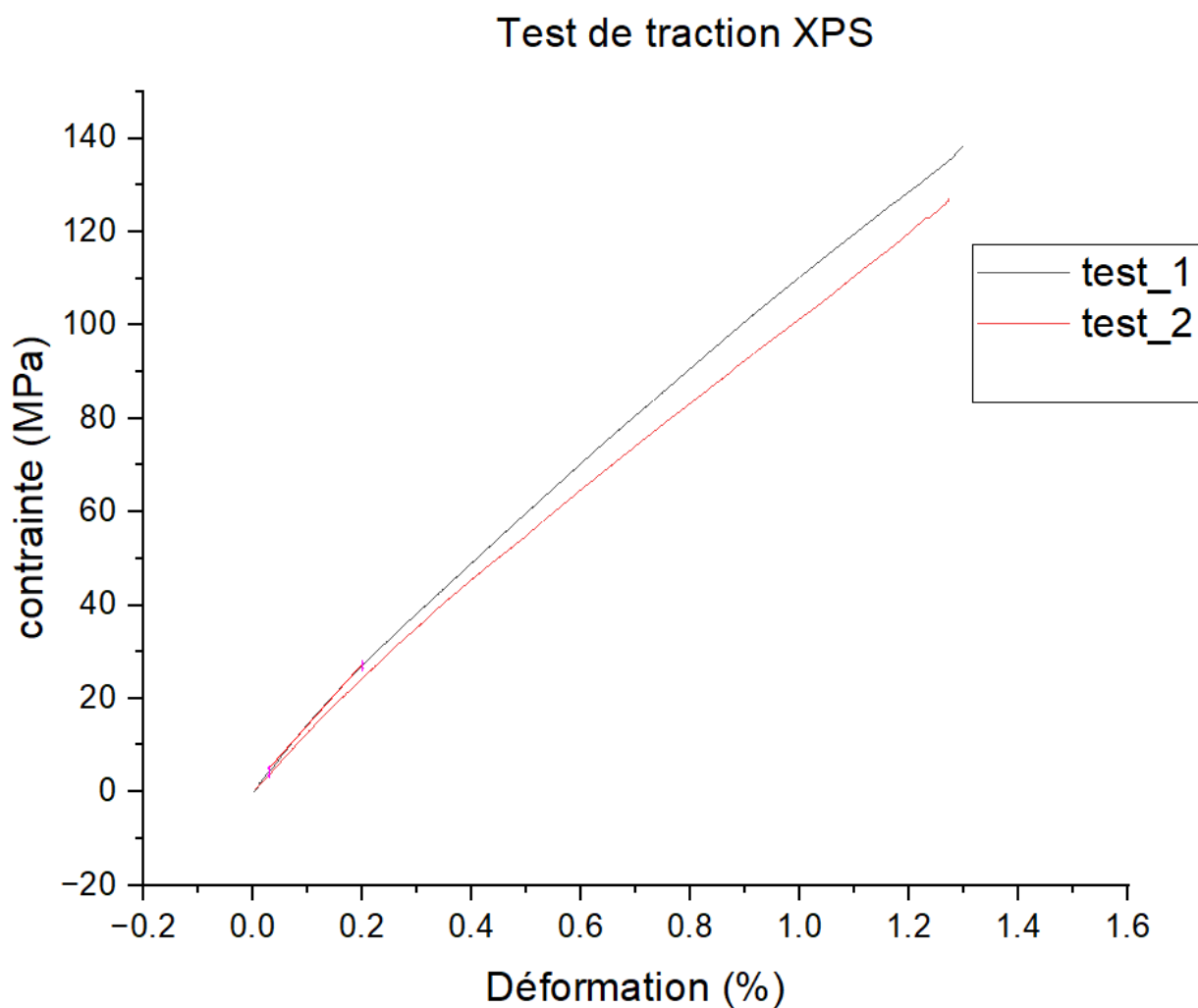


FIGURE 3.22 – Courbes de traction pour les sandwichs à âme XPS (test_1 et test_2)

Commentaire : Les deux courbes présentent une rigidité inférieure à celle de la fibre de verre pleine. On observe une rupture plus précoce. Cela est dû à la faible contribution mécanique du noyau en mousse XPS, dont l'adhésion aux peaux peut varier.

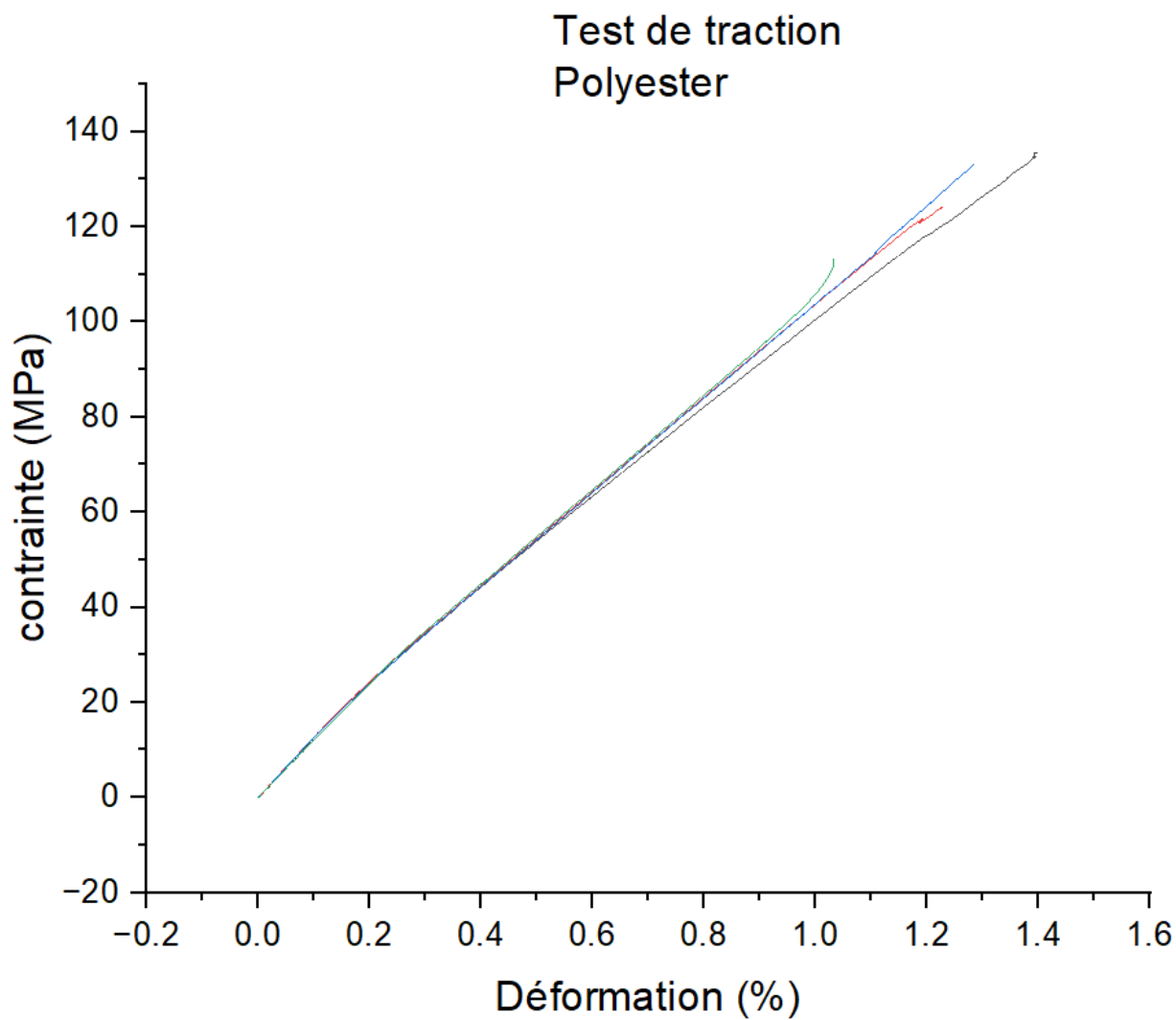


FIGURE 3.23 – Courbes de traction pour les sandwichs à âme polyester (4 éprouvettes)

Commentaire : Les courbes présentent une dispersion plus marquée, traduisant des différences de qualité de fabrication entre éprouvettes. Certaines ruptures ont été prématurées, sans plateau plastique marqué, en raison de défauts d'adhésion ou de noyaux peu absorbants.

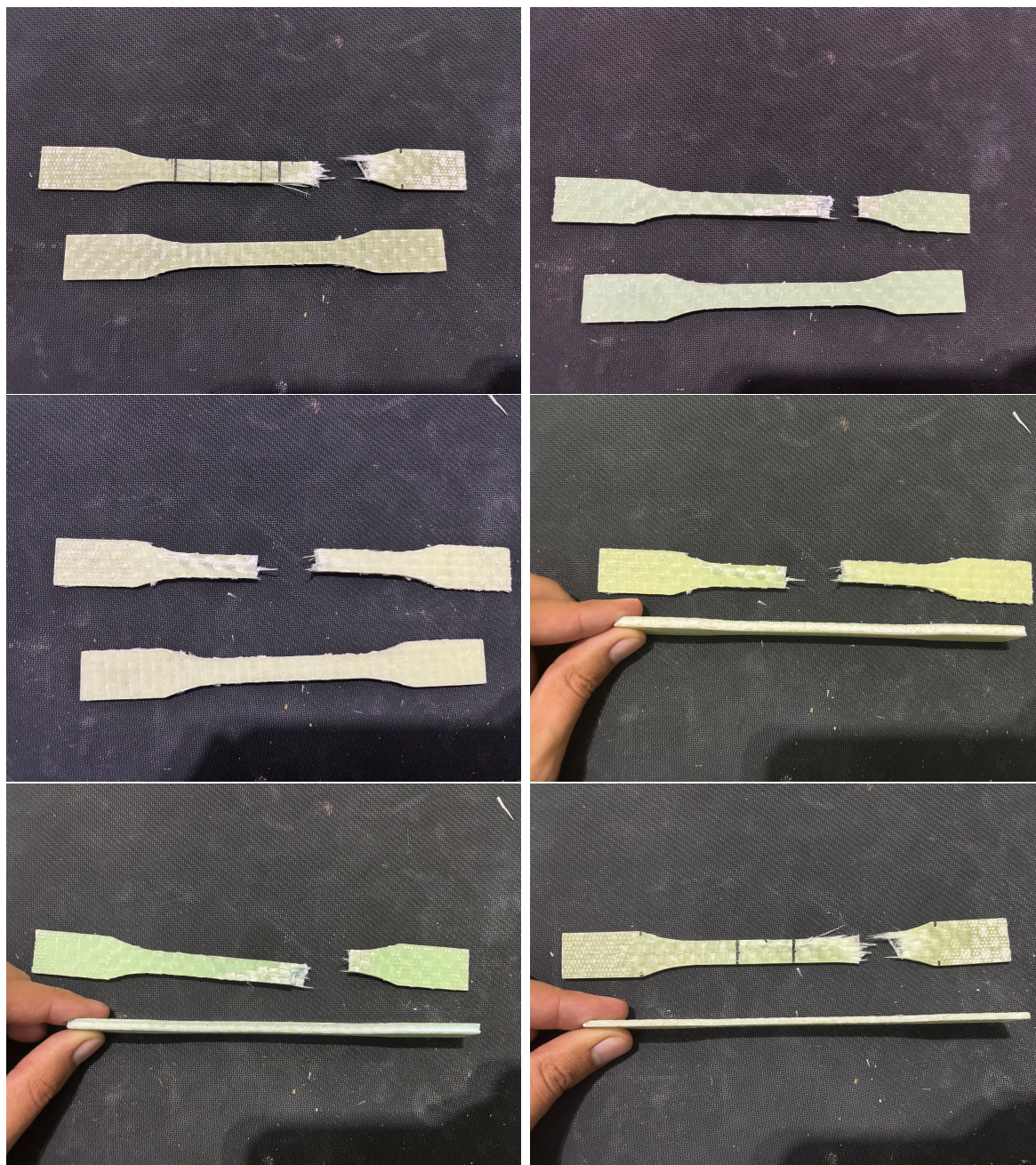


FIGURE 3.24 – Éprouvettes de traction avant et après rupture

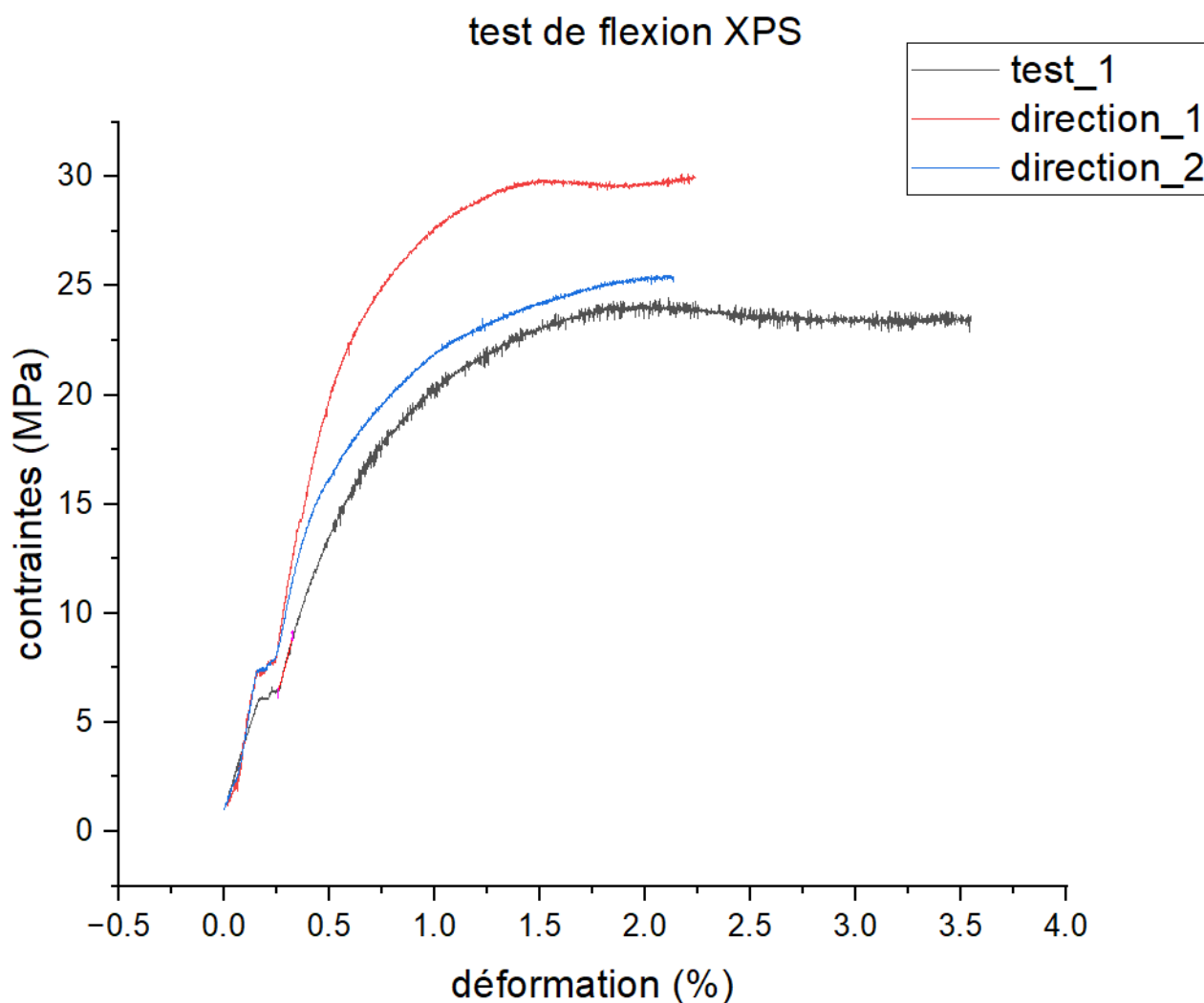


FIGURE 3.25 – Résultats de flexion sur matériaux à âme XPS, avec trois configurations de rainurage

Commentaire : Les différences de rigidité observées entre les courbes sont dues aux variations dans la configuration des noyaux. Les courbes présentant les modules les plus élevés correspondent aux éprouvettes dont les noyaux ont été préalablement rainurés avec un fil chaud. Cette opération a favorisé une meilleure pénétration de la résine et donc une meilleure adhésion entre les peaux et le noyau. À l'inverse, les éprouvettes sans rainurage montrent une déformation plus importante et une résistance réduite.

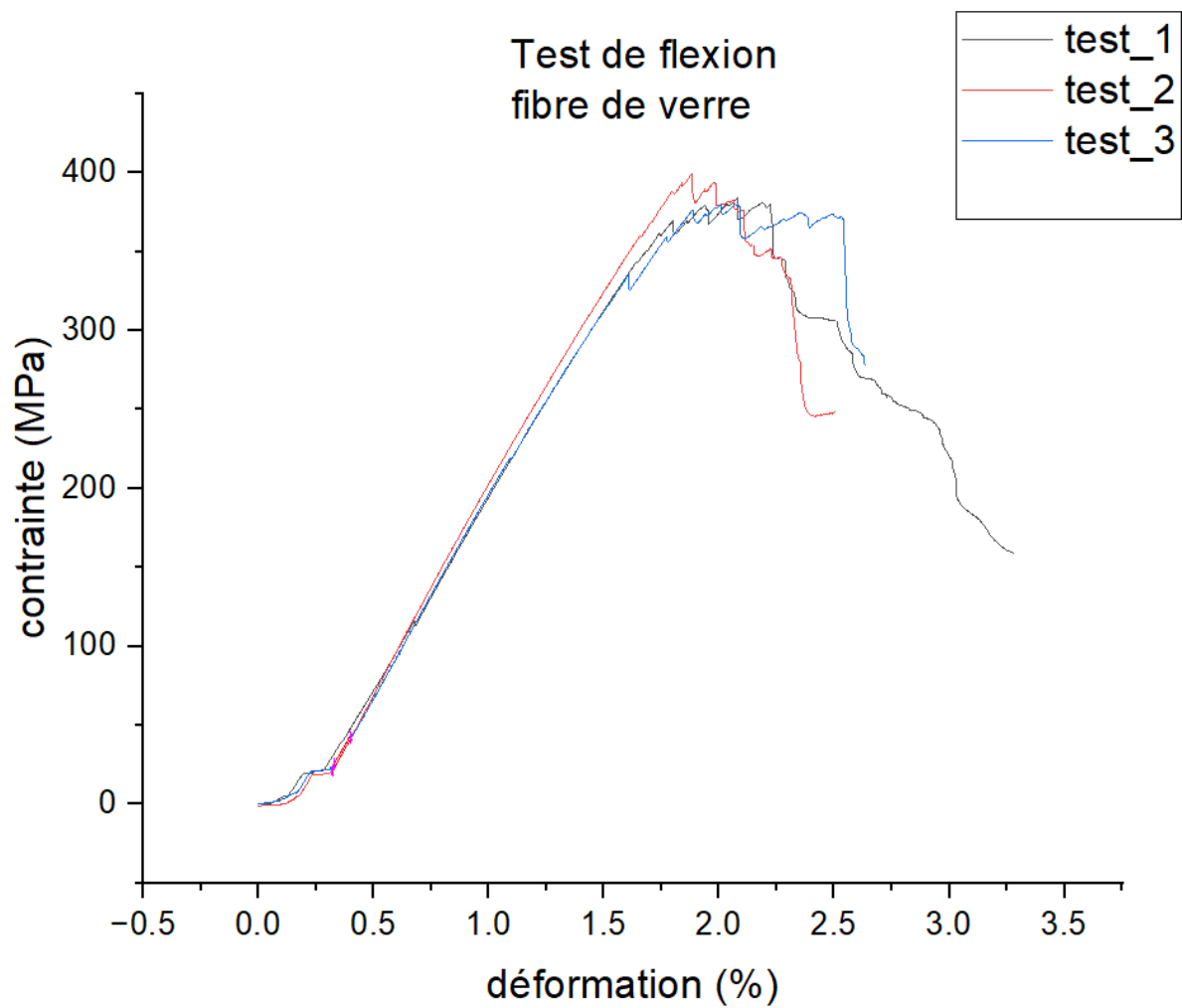


FIGURE 3.26 – Résultats de flexion sur matériaux fibre de verre 7 couches.

Commentaire : Les courbes confirment un comportement rigide et homogène, avec une montée en charge linéaire suivie d'un pic de rupture nette. Cela valide l'utilisation de la fibre de verre comme matériau principal dans les zones critiques du drone.

TABLE 3.2 – Résultats des essais de flexion

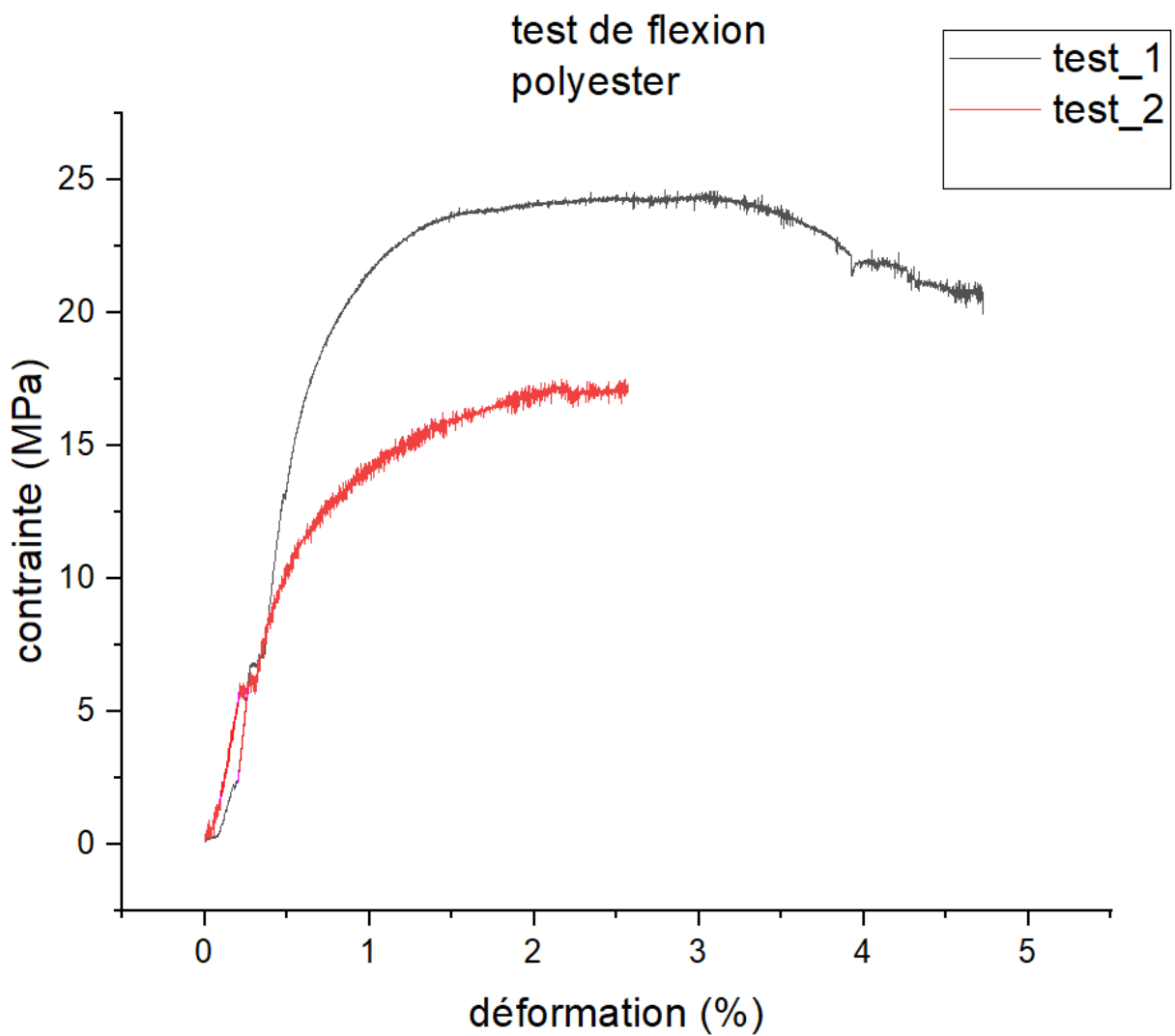


FIGURE 3.27 – Courbes de flexion des matériaux sandwichs à âme polyester (test_1 et test_2)

Commentaire : Les différences marquées entre les deux courbes s'expliquent par la préparation des éprouvettes. L'éprouvette ayant obtenu les meilleurs résultats est celle dont le noyau a été agressé avec un fil chaud afin d'améliorer l'adhérence avec la résine. Cette meilleure imprégnation a conduit à une rigidité accrue. En revanche, la seconde éprouvette, sans traitement du noyau, présente une flexion plus marquée avec un plateau de déformation.

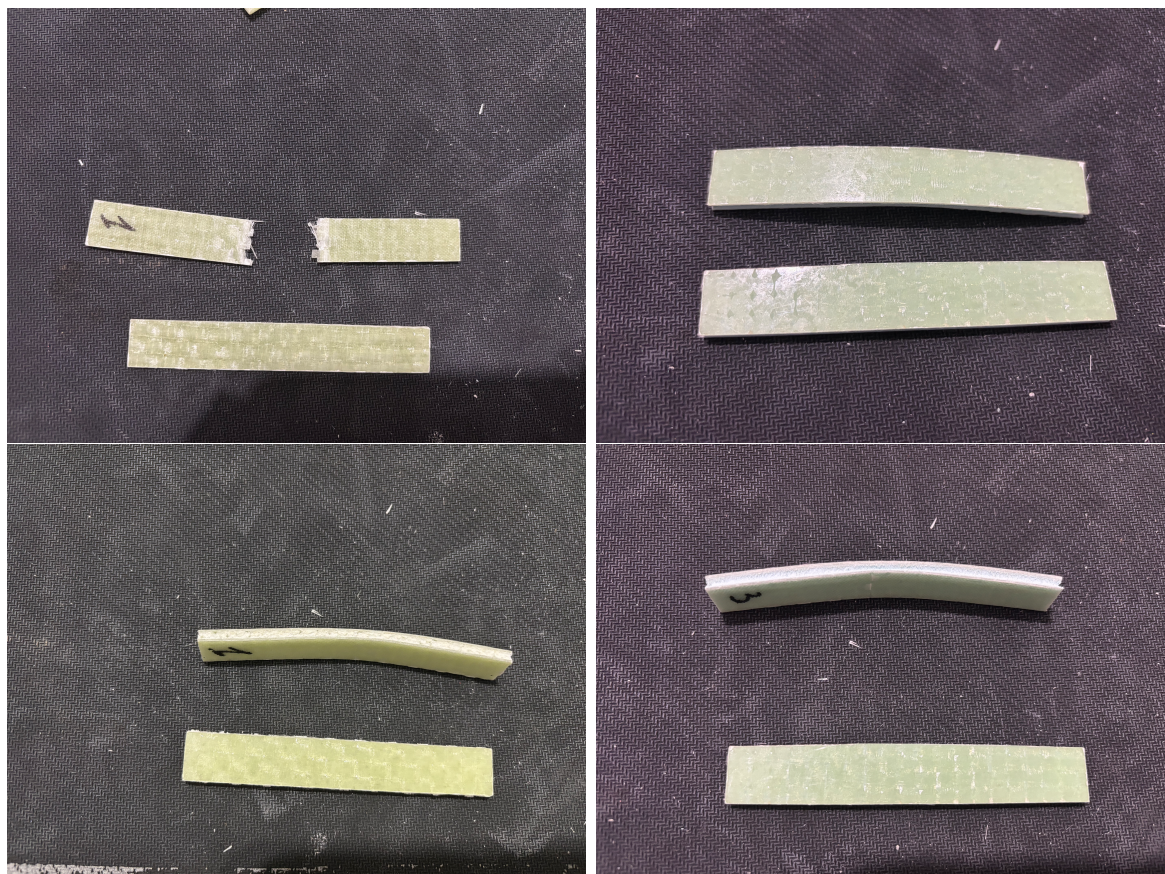


FIGURE 3.28 – Éprouvettes de flexion avant et après rupture ou fléchissement permanent

3.7 Résultat expérimentaux

3.7.1 Résultats des essais de traction

Les essais de traction ont permis de déterminer les modules de Young et les résistances maximales des différents matériaux.

- **Fibre de verre stratifiée** : Les résultats montrent une réponse linéaire jusqu'à rupture avec un module moyen de l'ordre de 40 GPa et une contrainte maximale avoisinant les 430 MPa.
- **Sandwichs à âme XPS** : Les courbes présentent une rigidité nettement plus faible, avec des modules compris entre 11.7 et 12.2 GPa. La rupture survient à des contraintes bien inférieures, autour de 130 MPa.
- **Sandwichs à âme polyester** : Des modules compris entre 12 et 13.7 GPa ont été mesurés, mais avec une dispersion plus importante dans les courbes, notamment en phase de rupture.

3.7.2 Résultats des essais de flexion

Les essais de flexion ont révélé des comportements mécaniques distincts :

- **Fibre de verre stratifiée** : Les courbes montrent un comportement linéaire suivi d'un pic de contrainte autour de 400 MPa avant rupture progressive. Le module de flexion moyen est évalué à environ 24.8 GPa.

- **Sandwichs à âme XPS** : Les trois configurations montrent des performances très variables. Le meilleur résultat (avec rainurage en quadrillage) atteint un module d'environ 5.8 GPa, alors que sans rainurage, la valeur tombe à 3.7 GPa.
- **Sandwichs à âme polyester** : Les modules mesurés sont très faibles (entre 3.4 et 5.8 GPa), avec une rupture plus précoce. Les courbes présentent une longue phase plastique suivie d'un plateau.

3.7.3 Tableau comparatif et analyse critique

Matériau	Module de traction (GPa)	Module de flexion (GPa)
Fibre de verre 7 couches	40.5	24.8
Sandwich XPS (meilleur cas)	12.0	5.8
Sandwich polyester (meilleur cas)	13.5	5.8

TABLE 3.3 – Comparaison des modules mécaniques mesurés pour chaque type d'éprouvette

L'analyse montre clairement que la fibre de verre stratifiée offre des performances mécaniques très supérieures, aussi bien en traction qu'en flexion. Les matériaux sandwichs, bien que plus légers, présentent une rigidité et une résistance nettement inférieures.

3.7.4 Discussion sur les matériaux sandwichs

Les performances décevantes des matériaux sandwichs peuvent s'expliquer par plusieurs facteurs :

- **Mauvaise imprégnation du noyau** : Les âmes en XPS et polyester ont montré une faible capacité à absorber la résine. Cela limite fortement l'adhérence entre les peaux de fibre et le noyau.
- **Problèmes d'adhésion** : Des délaminages ont été observés visuellement après les essais, traduisant une faiblesse de liaison entre les couches.
- **Absence de renforts internes** : Le noyau ne participe que très faiblement à la reprise de contrainte, ce qui diminue considérablement les performances globales du sandwich.

3.7.5 Propositions d'amélioration

Pour améliorer ces matériaux, plusieurs pistes sont proposées :

- **Impression des noyaux en motif nid d'abeille** à l'aide de la machine à fil chaud, afin d'optimiser la distribution de la résine et augmenter la surface d'adhérence.
- **Utilisation de noyaux plus absorbants** ou modifiés chimiquement pour une meilleure adhésion avec la matrice.
- **Ajout de connecteurs mécaniques internes** ou tiges traversantes pour renforcer la liaison noyau-peaux.

3.7.6 Conclusion de l'étude expérimentale

Cette étude expérimentale a permis d'objectiver les performances mécaniques de différents matériaux susceptibles d'être intégrés à la structure du drone aquatique. Les résultats ont clairement mis en

évidence la supériorité de la fibre de verre stratifiée en 7 couches, qui présente à la fois une excellente rigidité et une bonne résistance en traction et flexion. Les matériaux sandwichs, bien qu'intéressants du point de vue du poids, n'atteignent pas des niveaux de performance suffisants dans leur configuration actuelle. Des améliorations restent néanmoins envisageables, ouvrant la voie à de futures recherches et optimisations pour des prototypes de seconde génération.

Chapitre 4

Analyse hydrodynamique de la coque du drone aquatique de sauvetage par simulation CFD

4.1 Contexte théorique

4.1.1 Introduction

La dynamique des fluides numérique (CFD, Computational Fluid Dynamics) constitue un outil puissant pour l'étude des écoulements complexes dans des domaines variés, notamment l'aéronautique, le naval et les procédés industriels. Dans le cadre de l'analyse des écoulements multiphasiques, la méthode VOF (Volume of Fluid) est largement utilisée pour suivre l'interface entre deux fluides immiscibles, tels que l'air et l'eau.

La méthode VOF repose sur la résolution des équations de Navier-Stokes couplées à une équation de transport du volume fractionnaire, permettant de localiser et de suivre l'évolution de l'interface au cours du temps. Dans une simulation transitoire, ces équations sont résolues de manière temporelle pour capturer les phénomènes instationnaires, tels que les variations de surface libre, les éclaboussures, ou les impacts d'ondes sur une structure.

Ce type de simulation permet ainsi de prédire avec précision le comportement dynamique des interfaces fluides dans des conditions réalistes, en tenant compte des interactions complexes entre les phases et des effets transitoires.

4.1.2 Modélisation numérique et techniques de simulation à surface libre

Le comportement des drones aquatiques opérant près de la surface libre implique des caractéristiques de flux complexes telles que la formation d'ondes, la séparation du flux et la variation dynamique de la pression. Ces phénomènes ne peuvent pas être capturés avec précision uniquement par des modèles analytiques, ils nécessitent donc une simulation numérique utilisant la dynamique des fluides numérique (CFD). Cette section décrit les approches numériques fondamentales pertinentes pour simuler de tels flux multiphasiques et instationnaires.

Simulations transitoires vs. stationnaires Les simulations CFD peuvent être classées comme **stationnaires** ou **transitoires** :

- *Simulations stationnaires* : Elles supposent que le flux atteint un équilibre et ne varie pas avec le temps. Bien que plus efficaces en termes de calcul, cette approche n'est pas adaptée pour des problèmes impliquant des comportements dépendant du temps tels que la génération d'ondes ou des forces transitoires.
- *Simulations transitoires* : Contrairement aux simulations stationnaires, elles résolvent le flux au fur et à mesure de son évolution dans le temps. C'est essentiel pour capturer avec précision la **déformation de la surface libre**, la **propagation des vagues**, et d'autres phénomènes instationnaires communs dans le mouvement aquatique à grande vitesse.

Suivi de surface libre avec la méthode VOF En CFD, la modélisation de l'interaction entre deux fluides immiscibles (généralement l'air et l'eau) nécessite une technique de capture de surface libre. La méthode **Volume of Fluid (VOF)** est couramment utilisée à cette fin.

- La méthode VOF assigne une valeur scalaire (fraction volumique) à chaque cellule de calcul :
 - o Une cellule remplie entièrement d'eau a une fraction volumique de 1,
 - o Une cellule remplie entièrement d'air a une fraction volumique de 0,
 - o Les valeurs intermédiaires indiquent les régions de l'interface.
- La surface libre est reconstruite à partir de ces fractions, permettant à la simulation de capturer la rupture des vagues, les éclaboussures et l'immersion.

Modélisation de la turbulence Le flux autour d'une coque aquatique est généralement turbulent, surtout à des nombres de Reynolds élevés. La simulation numérique directe (DNS) est impraticable pour les problèmes à l'échelle de l'ingénierie, c'est pourquoi les modèles **Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)** sont utilisés.

L'un des modèles les plus efficaces pour de telles applications est le modèle **SST $k-\omega$** :

- Il combine le modèle $k-\omega$ près des parois avec le modèle $k-\varepsilon$ dans le champ lointain.
- Il fournit des prédictions précises dans les régions présentant des **pentés de pression défavorables**, la **séparation du flux**, et la **turbulence de surface libre**.
- Il est largement utilisé dans les applications marines et aéronautiques en raison de son équilibre entre précision et efficacité.

Considérations supplémentaires Plusieurs autres aspects numériques sont critiques pour la stabilité et la précision :

- **Couplage pression-vitesse** : Des algorithmes tels que SIMPLE ou PISO sont utilisés pour coupler les champs de pression et de vitesse dans les solveurs de flux incompressibles.
- **Discretisation temporelle** : La taille du pas de temps doit être suffisamment petite pour résoudre les mouvements des vagues et les effets transitoires, surtout lors de l'utilisation de la méthode VOF.
- **Nombre de Courant Friedrichs Lewy (CFL)** : Ce paramètre adimensionnel gouverne le pas de temps maximal autorisé dans les simulations transitoires. Il est défini comme suit :

$$\text{CFL} = \frac{U \Delta t}{\Delta x} \quad (4.1)$$

où :

- U : vitesse du flux local,
- Δt : taille du pas de temps,
- Δx : taille de la cellule du maillage local.

Pour les flux à surface libre utilisant VOF, le nombre CFL est généralement maintenu en dessous de 0.5 (souvent inférieur à 0.25) pour garantir la stabilité numérique et une capture précise de l'interface.

- **Raffinement du maillage** : Un maillage fin est nécessaire dans les régions près de la surface de la coque, du sillage et de l'interface eau-air pour capturer avec précision les gradients de pression, de vitesse et d'interface.

Résumé La simulation du comportement hydrodynamique des drones aquatiques proches de la surface libre nécessite des méthodes numériques avancées. L'approche **transitoire**, combinée à la **méthode VOF** et au modèle de turbulence **SST $k-\omega$** , forme un cadre théorique robuste pour capturer les interactions des vagues, les charges dynamiques et le comportement global du flux en CFD.

4.1.3 Équations gouvernantes du flux de fluide

La dynamique des fluides numérique (CFD) repose sur la résolution numérique des équations fondamentales qui décrivent le mouvement des fluides. Il s'agit de l'**équation de continuité** pour la conservation de la masse et des **équations de NavierStokes** pour la conservation du moment. Ensemble, elles forment la base pour simuler les flux incompressibles et visqueux rencontrés dans l'exploitation d'un drone aquatique.

Équation de continuité L'équation de continuité garantit la conservation de la masse dans le flux :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (4.2)$$

Pour les flux incompressibles, où la densité ρ est constante, cela se simplifie en :

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (4.3)$$

Équations de NavierStokes Les équations de NavierStokes expriment la conservation du moment sous forme vectorielle :

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} + \vec{F} \quad (4.4)$$

où :

- $\vec{u}$: champ de vecteurs de vitesse,
- p : champ de pression,
- μ : viscosité dynamique du fluide,
- $\vec{F}$: forces extérieures (par exemple, la gravité),
- ρ : densité du fluide.

Ces équations décrivent l'équilibre entre les forces inertielles, les gradients de pression, la diffusion visqueuse et les forces externes.

Hypothèses pour les applications CFD à surface libre Dans le cadre de la simulation d'un drone aquatique interagissant avec la surface de l'eau, les hypothèses suivantes sont généralement faites :

- **Flux incompressible** : La densité du fluide est supposée constante.
- **Fluide newtonien** : La viscosité du fluide est constante et linéaire avec le taux de déformation.
- **Modélisation de la turbulence** : La fermeture est obtenue à l'aide de modèles tels que RANS (par exemple, SST $k-\omega$).
- **Interface multiphase** : L'interface eau-air est capturée à l'aide de méthodes telles que VOF.

Solution numérique Ces équations sont discrétisées et résolues sur un maillage en utilisant des méthodes de volumes finis. Les dérivées temporelles et spatiales sont approximées par des schémas numériques, et la convergence est obtenue par des solveurs itératifs. Pour les problèmes transitoires, des algorithmes d'intégration temporelle (par exemple, des méthodes implicites ou explicites) sont utilisés en combinaison avec les contraintes du nombre de Courant.

Résumé Les équations de continuité et de NavierStokes forment la base mathématique de la CFD. Combinées avec des modèles de turbulence appropriés et des techniques de capture d'interface, elles permettent de simuler avec précision les flux de fluide autour de géométries complexes telles qu'un drone de sauvetage aquatique.

4.2 Simulation numérique de l'écoulement (CFD)

4.2.1 Objectifs de la simulation

Dans le cadre de ce projet, une simulation numérique de type transitoire est mise en œuvre afin d'analyser l'interaction entre le drone aquatique et l'écoulement environnant. L'approche retenue repose sur le modèle **VOF (Volume of Fluid)**, permettant de simuler l'écoulement diphasique (air/eau) et de capturer la dynamique de la surface libre.

Cette simulation vise à extraire des données hydrodynamiques essentielles pour l'évaluation des performances du drone en phase de translation à vitesse constante.

4.2.1.1 Grandeurs étudiées

Les principales grandeurs physiques ciblées sont :

- **La traînée hydrodynamique** : force principale s'opposant à l'avancement, influencée par la géométrie de la coque, l'écoulement autour du corps et l'interaction avec la surface libre. Cette grandeur est considérée comme fiable dans le cadre d'un modèle rigide.
- **La portance** : mesurée mais jugée peu représentative dans ce contexte. Le drone étant fixé, il ne peut se soulever sous l'effet de la portance. En situation réelle, ce phénomène réduirait l'immersion et donc la résistance ; ici, la portance est surestimée.
- **La génération de vagues** : l'objectif est d'observer la formation et l'évolution des vagues induites par la présence du drone, notamment la résistance de vague (*wave drag*), significative à des nombres de Froude intermédiaires.

4.2.1.2 Hypothèses simplificatrices

La simulation repose sur les hypothèses suivantes :

- Le drone est modélisé comme un **corps rigide et fixe** dans le domaine fluide.
- Le domaine est constitué d'un bassin rectangulaire rempli d'eau et d'air, avec le drone immergé partiellement.
- L'écoulement est généré par une **vitesse imposée de 2 à 3 m/s** en entrée.
- Le modèle de turbulence utilisé est le **SST $k-\omega$** .
- La **forme du drone a été retirée** du volume de contrôle afin de créer un maillage fluide propre autour de la coque.
- Les effets de portance dynamique réels (déjaugage) ne sont pas modélisés ; la traînée obtenue représente donc une **valeur légèrement surestimée** par rapport à la réalité.

4.2.2 Préparation de la géométrie et simplifications

La géométrie utilisée pour la simulation numérique a été directement extraite du modèle CAO développé sous SolidWorks. Elle a été exportée au format **.STEP**, compatible avec la plupart des logiciels de maillage et de simulation numérique.

4.2.2.1 Nettoyage et réduction de la complexité

Afin de faciliter la génération du maillage et de réduire les temps de calcul, plusieurs opérations de simplification ont été réalisées sur le modèle :

- Réduction du nombre de surfaces et de détails inutiles (arêtes internes, congés, petits éléments),
- Fermeture des volumes ouverts,
- Suppression des éléments purement esthétiques ou non significatifs pour l'écoulement.

Ces simplifications permettent d'obtenir une géométrie plus robuste numériquement et adaptée à un maillage volumique de qualité.

4.2.2.2 Application de la symétrie

Le drone étant globalement symétrique par rapport à son axe longitudinal, une symétrie a été appliquée afin de ne conserver que la moitié du domaine de calcul. Cette opération permet de :

- Réduire le volume total à mailler,
- Diminuer le nombre d'éléments et donc le coût de simulation,
- Conserver une représentation fidèle de l'écoulement réel en imposant des conditions limites de symétrie appropriées.

4.2.2.3 Positionnement et immersion

Le drone a été positionné de manière à être partiellement immergé dans le domaine fluide. Le niveau d'eau a été défini selon une ligne de flottaison (waterline) représentative du fonctionnement réel du drone à vitesse constante. Cette immersion initiale permet de simuler correctement l'interaction avec la surface libre tout en respectant l'équilibre hydrostatique supposé.

4.2.3 Définition du domaine et conditions aux limites

4.2.3.1 Dimensions du domaine de calcul

Le domaine de simulation est un volume rectangulaire représentant un bassin contenant à la fois l'air et l'eau. Ses dimensions ont été choisies de manière à éviter toute interaction artificielle entre les parois et le sillage du drone. Le volume total mesure :

- **8 mètres de longueur** (direction de l'écoulement),
- **1,5 mètre de largeur**,
- **1,5 mètre de hauteur**.

Ces dimensions garantissent un espace suffisant en amont et en aval du drone pour capturer correctement la formation des vagues, la turbulence de sillage et les variations de pression.

4.2.3.2 Conditions d'entrée

Trois cas de simulation ont été étudiés :

-
- Écoulement à **2 m/s** avec un angle de trim fixé à **1°**,
 - Écoulement à **3 m/s** avec un angle de trim de **1°**,
 - Écoulement à **3 m/s** avec un angle de trim de **4°**.

La condition d'entrée est donc définie comme une **vitesse uniforme imposée** (*velocity inlet*) dans la direction longitudinale du domaine. Le fluide est constitué d'un mélange air/eau simulé à l'aide du modèle **VOF**.

4.2.3.3 Condition de sortie

La sortie du domaine est définie comme une **sortie à pression nulle** (*pressure outlet*), avec une pression statique fixée à 0 Pa (référence atmosphérique). Cette condition permet l'évacuation naturelle du fluide sans réflexion d'onde.

4.2.3.4 Parois latérales, supérieure et inférieure

- Une paroi latérale est définie comme une **symétrie**, en cohérence avec l'utilisation d'un demi-domaine (symétrie axiale du drone).
- L'autre paroi latérale est un **mur glissant** (*slip wall*) pour éviter toute perturbation locale.
- Le **plafond** et le **fond** du domaine sont également définis comme **murs glissants**, permettant d'éviter les effets de friction non physiques et de mieux représenter un environnement ouvert.

4.2.3.5 Surface du drone

La surface du drone est modélisée comme un **mur non glissant** (*no-slip wall*), avec un **facteur de rugosité fixé à 0,5** afin de simuler la rugosité moyenne d'une coque composite non polie. Cette condition permet de capturer les efforts de traînée visqueuse et de pression.

4.2.3.6 Fraction de phase et ligne de flottaison

La ligne de séparation entre l'air et l'eau est positionnée à **0,055 m au-dessus de l'origine** :

- La phase liquide (eau) occupe la zone de **1 m à 0,055 m**,
- La phase gazeuse (air) est définie entre **0,055 m et 0,5 m**.

Ces valeurs permettent de représenter une immersion partielle réaliste du drone tout en assurant la stabilité numérique de l'interface air/eau.

4.2.4 Génération du maillage

Le maillage du domaine de simulation a été réalisé à l'aide du logiciel **ANSYS Meshing**, en tenant compte des exigences de précision dans la zone de surface libre ainsi que de la nécessité de limiter les coûts de calcul.

4.2.4.1 Type de maillage

Un maillage initial de type **tétraédrique** a été généré automatiquement sur l'ensemble du domaine. Ce type de maillage est particulièrement adapté aux géométries complexes comme celle du drone, mais peut produire un nombre élevé d'éléments avec une qualité variable.

Pour améliorer la qualité numérique et l'efficacité de la simulation, ce maillage tétraédrique a ensuite été **converti en maillage polyédrique** dans le solveur. Les cellules polyédriques offrent une meilleure résolution des gradients de pression et de vitesse, tout en réduisant le nombre d'éléments nécessaires pour une précision équivalente.

4.2.4.2 Raffinement local autour de la surface libre

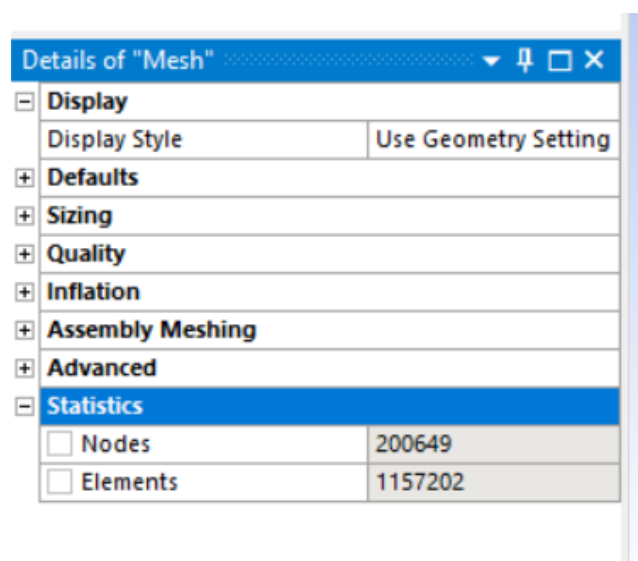
Une attention particulière a été portée à la zone de la **ligne de flottaison** (interface air/eau), zone critique pour la formation de vagues. Un **bandeau de raffinement** de **0,3 mètre d'épaisseur** a été défini autour de cette interface, avec une taille de cellule de seulement **0,03 mètre**, permettant une capture fine des variations de surface.

Dans les autres zones du domaine, une taille de cellule plus grande, de **0,1 mètre**, a été utilisée afin de réduire le nombre total d'éléments tout en conservant une précision suffisante dans les zones moins sensibles.

4.2.4.3 Caractéristiques globales du maillage

Le maillage final présente les caractéristiques suivantes :

- **Nombre total d'éléments** : environ **1,1 million de cellules**,
- **Taille minimale des cellules** : **0,03 m** dans la zone raffinée,
- **Taille maximale des cellules** : **0,1 m** en zone éloignée,
- **Taux de croissance** : **1,2**, assurant une transition progressive entre les zones fines et grossières.



The image shows a software window titled "Details of 'Mesh'". It contains a tree view on the left with expandable sections: Display, Defaults, Sizing, Quality, Inflation, Assembly Meshing, Advanced, and Statistics. The Statistics section is expanded, showing a table with two rows: "Nodes" with a value of 200649 and "Elements" with a value of 1157202. Each row has a checkbox to its left, which is currently unchecked.

Details of "Mesh"	
Display Style Use Geometry Setting	
Defaults	
Sizing	
Quality	
Inflation	
Assembly Meshing	
Advanced	
Statistics	
☐ Nodes	200649
☐ Elements	1157202

FIGURE 4.1 – nombre d'éléments

Cette configuration permet un bon compromis entre **précision locale** dans les zones critiques et **réduction du temps de calcul global**.

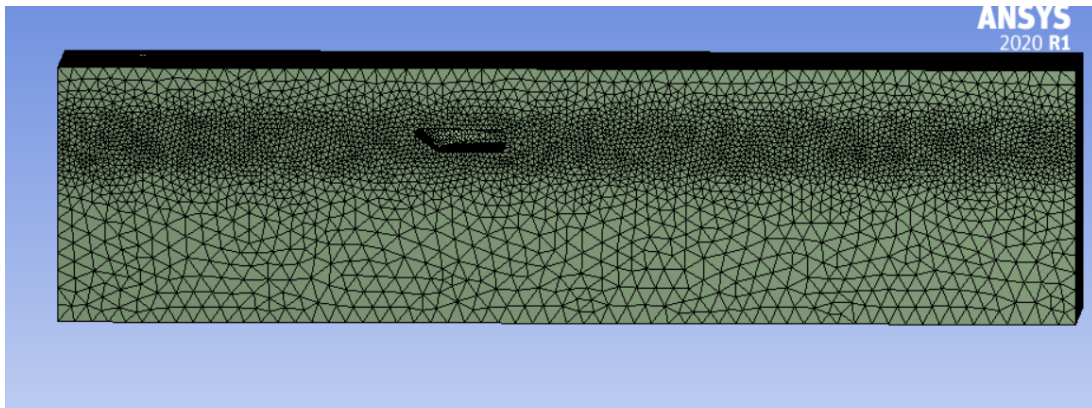


FIGURE 4.2 – Maillage du domaine autour du drone avec raffinement près de la surface libre

4.2.5 Modèles physiques et paramètres de simulation

4.2.5.1 Modèle physique

La simulation a été réalisée en régime **transitoire**, avec modélisation de la surface libre à l'aide du **modèle VOF (Volume of Fluid)**. Ce dernier permet de simuler l'interaction entre deux phases non miscibles (air et eau) en suivant l'évolution de la fraction volumique de chaque fluide dans le domaine.

La gravité est activée dans la direction verticale ($-g = -9,81 \text{ m/s}^2$) afin de permettre la formation correcte des vagues et la prise en compte des effets de flottabilité.

Pour la turbulence, le modèle **SST $k-\omega$** a été utilisé. Ce modèle hybride offre un bon compromis entre précision dans les zones proches des parois (couches limites) et robustesse dans le sillage et les zones de recirculation.

4.2.5.2 Paramètres temporels

La simulation est exécutée en mode **transitoire**, avec un pas de temps choisi en fonction de la vitesse d'écoulement et des critères de stabilité numérique (CFL).

Trois configurations ont été testées :

- **Cas 1** : vitesse de 2 m/s, angle de trim de 1°
 - o Pas de temps : 0,003 s
 - o Temps total simulé : 10 s
 - o Nombre de pas de temps : 3333
 - o Itérations par pas : 15
- o **Cas 2** : vitesse de 3 m/s, angle de trim de 1°
- o **Cas 3** : vitesse de 3 m/s, angle de trim de 4°
 - * Pas de temps : 0,002 s
 - * Temps total simulé : 10 s
 - * Nombre de pas de temps : 5000
 - * Itérations par pas : 30

(a) Configuration de simulation pour une vitesse de 3 m/s

(b) Configuration de simulation pour une vitesse de 2 m/s

FIGURE 4.3 – Paramètres numériques des cas de simulation à 2 m/s et 3 m/s

4.2.5.3 Calcul du nombre de CFL

Le nombre de CourantFriedrichsLewy (CFL) est un paramètre clé pour assurer la stabilité des simulations transitoires. Il est défini par la formule :

$$\text{CFL} = \frac{U \cdot \Delta t}{\Delta x}$$

où :

- U est la vitesse locale (m/s),
- Δt est le pas de temps (s),
- Δx est la taille caractéristique de la cellule (m).

Les cellules les plus petites du maillage, localisées autour de la surface libre, ont une taille de $\Delta x = 0,03$ m. Ainsi, pour chaque simulation :

- À 2 m/s avec $\Delta t = 0,003$ s :

$$\text{CFL} = \frac{2 \times 0,003}{0,03} = 0,2$$

- À 3 m/s avec $\Delta t = 0,002$ s :

$$\text{CFL} = \frac{3 \times 0,002}{0,03} = 0,2$$

Ces valeurs respectent les recommandations classiques pour les simulations VOF, où le CFL doit rester inférieur à 0,5 afin d’assurer une bonne stabilité de l’interface air/eau et une convergence rapide.

4.2.5.4 Durée simulée et critères de convergence

Pour chaque simulation, la **durée totale simulée** a été fixée à **10 secondes**, permettant d’atteindre un régime hydrodynamique quasi-stationnaire et d’observer de manière réaliste la formation des vagues ainsi que l’évolution des forces de traînée et de portance.

Le critère de convergence à chaque pas de temps repose sur la diminution des résidus numériques des équations résolues :

- Un seuil de 10^{-4} a été imposé pour l’équation de **continuité**,
- Un seuil plus strict de 10^{-8} a été appliqué pour les équations de **quantité de mouvement**, de **turbulence (SST $k-\omega$)**, et de **fraction volumique de fluide (VOF)**.

En fonction de la complexité des cas simulés, **15 à 30 itérations** par pas de temps ont été autorisées pour garantir la stabilisation des champs de pression, vitesse et surface libre. Ces paramètres ont permis d’assurer la **fiabilité et la précision** des résultats dans la zone critique d’interface air/eau.

4.2.6 Analyse des résultats hydrodynamiques

4.2.6.1 Forces globales : traînée et portance

Les forces hydrodynamiques résultant des simulations sont synthétisées dans le tableau ci-dessous :

TABLE 4.1 – Forces de traînée et portance extraites des trois simulations

Cas	Vitesse (m/s)	Trim (°)	Traînée F_d (N)	Portance F_l (N)
1	2	1	44,3	32,4
2	3	1	183	101
3	3	4	210	130

Comme attendu, l’augmentation de la vitesse engendre une hausse significative des forces de traînée et de portance, conformément à la loi quadratique. L’augmentation de l’angle de trim induit une portance plus élevée mais également une traînée frontale plus importante.

4.2.6.2 Distribution de la pression et des phases

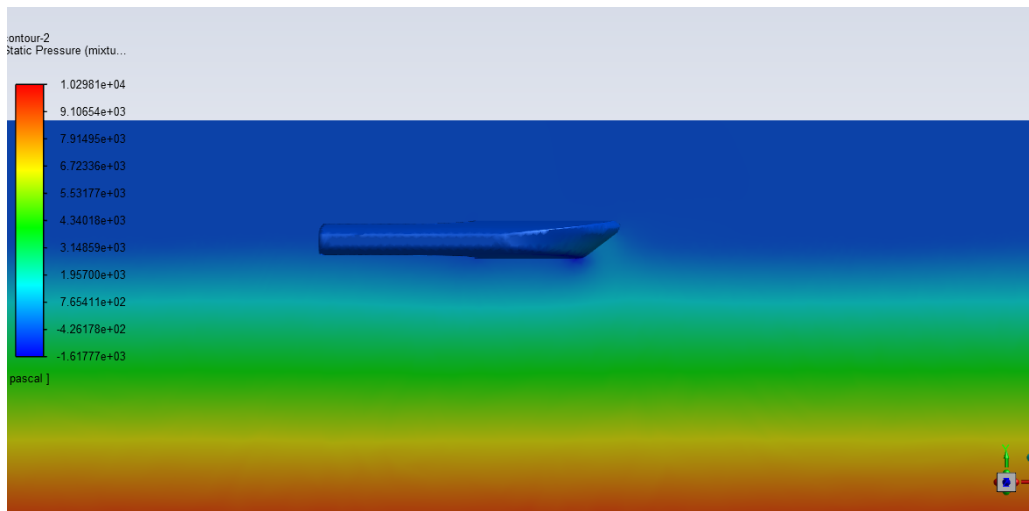


FIGURE 4.4 – Distribution de la pression statique Cas 1 : 2 m/s, trim 1°

Interprétation : La pression est concentrée au niveau de la proue, de manière symétrique. Le régime est stable, et la surface libre relativement calme, indiquant un écoulement modéré sans fort effet de planage.

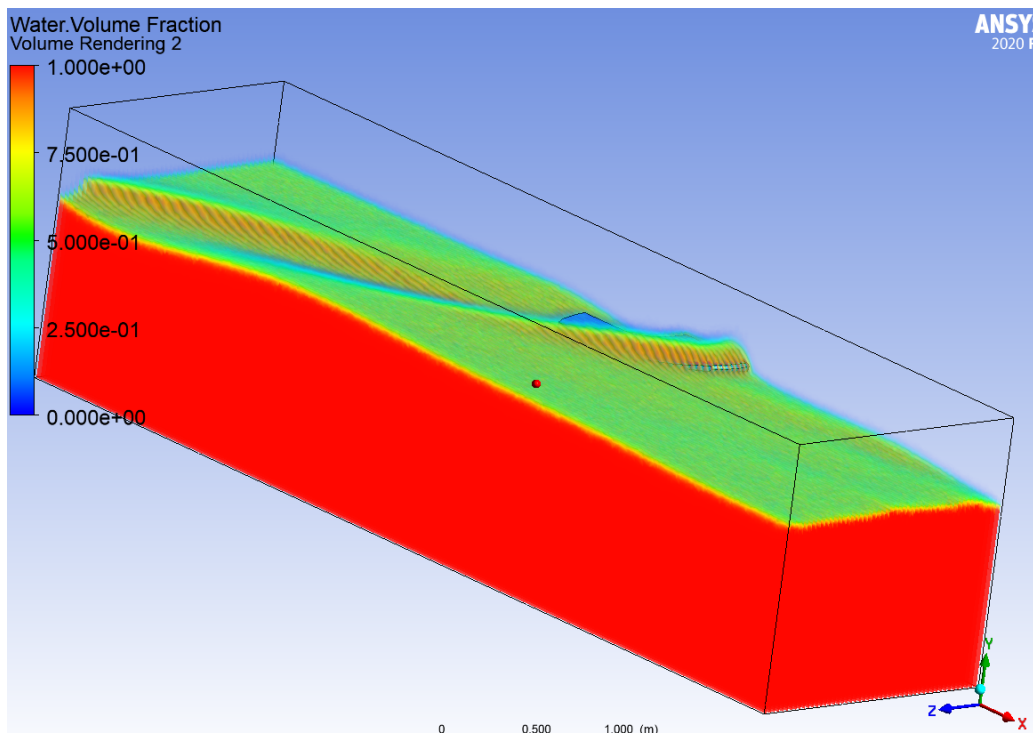


FIGURE 4.5 – Distribution de la pression statique Cas 2 : 3 m/s, trim 1°

Interprétation : À cette vitesse plus élevée, le gradient de pression s'intensifie, notamment à l'avant. On observe une montée de pression à l'étrave ainsi qu'un sillage plus étendu à l'arrière.

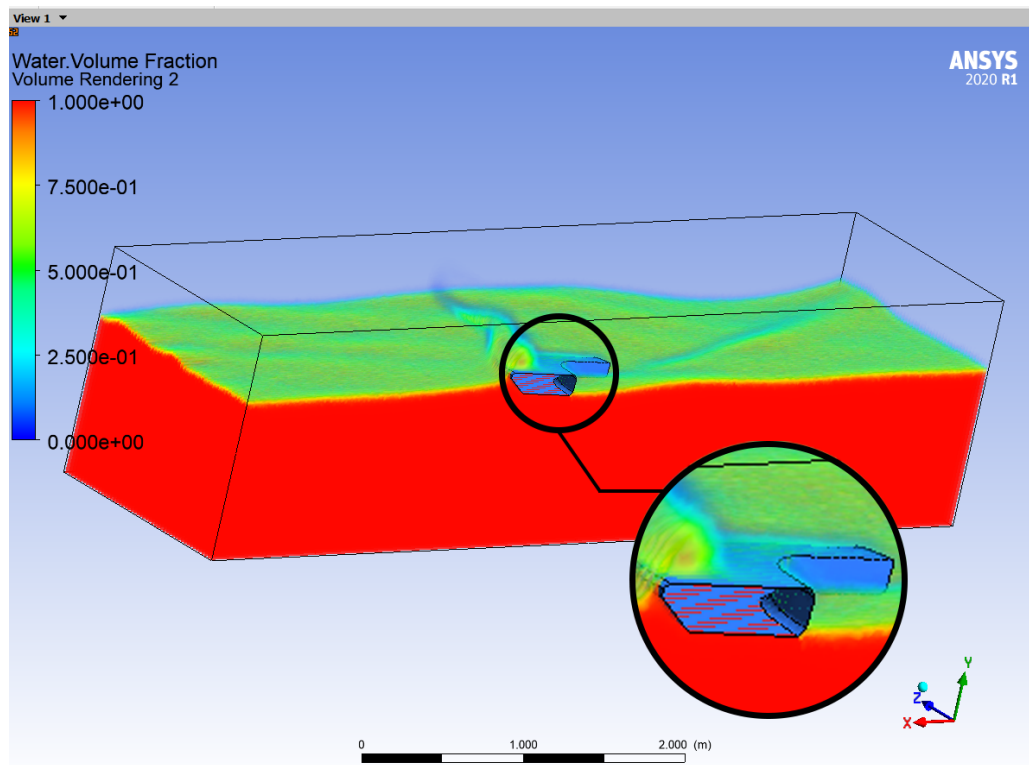


FIGURE 4.6 – Distribution de la pression statique Cas 3 : 3 m/s, trim 4°

Interprétation : L'angle de trim plus important induit une poussée verticale accrue à l'arrière. La pression est plus marquée au niveau du plan incliné, augmentant la portance mais aussi la traînée frontale.

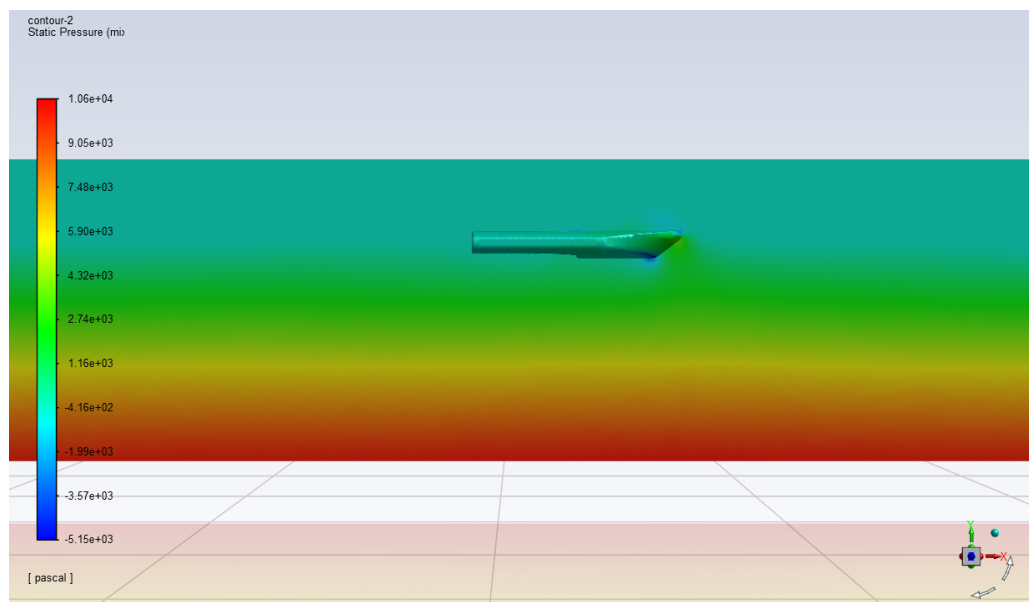


FIGURE 4.7 – Vue de profil distribution de pression au centre du volume de contrôle (3 m/s, 1°)

Remarque : Cette coupe met en évidence le gradient vertical de pression dans le fluide, confirmant l'importance de l'effet de portance sur l'arrière du drone à haute vitesse.

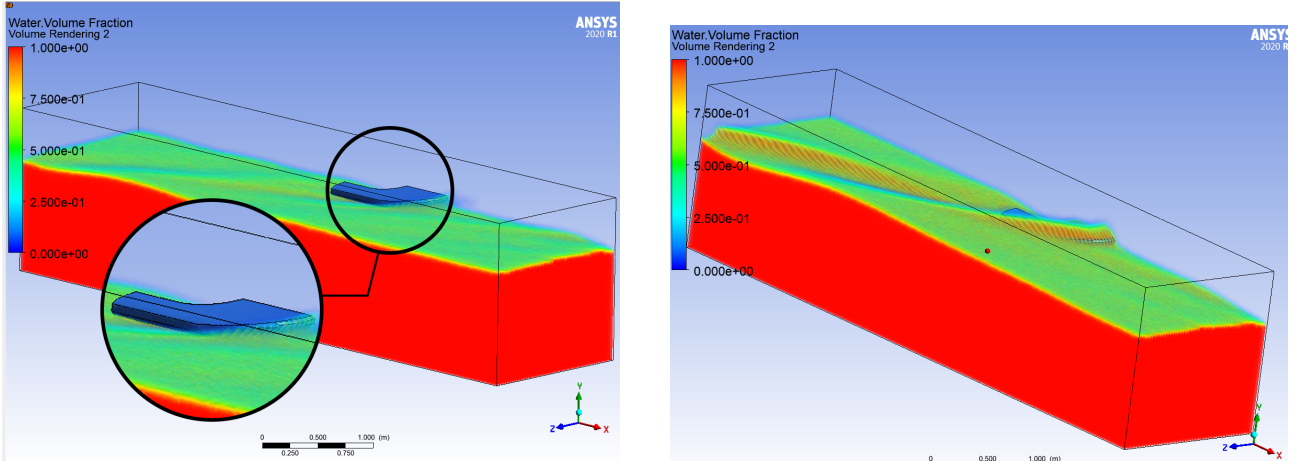


FIGURE 4.8 – Évolution de la surface libre pour 2 m/s (gauche) et 3 m/s trim 1° (droite)

Analyse complémentaire : La surface libre devient plus instable et marquée à mesure que la vitesse augmente. La génération de vagues est significative à 3 m/s avec trim, illustrant la résistance de vague croissante et la perte d'énergie par agitation.

4.2.7 Validation et discussion

Pour valider les résultats issus de la simulation CFD, une comparaison a été réalisée avec des estimations analytiques basées sur les coefficients de traînée viscous standards, tout en prenant en compte l'augmentation de la surface mouillée due à la formation d'une vague frontale.

4.2.7.1 Méthodologie basée sur une surface corrigée via la montée de la ligne de flottaison

La force de traînée est calculée à partir de la formule classique :

$$F_D = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_D$$

où :

- $\rho = 1024 \text{ kg/m}^3$ est la densité de l'eau,
- V est la vitesse du drone,
- A est la surface frontale immergée dynamique,
- $C_D = 0.32$ est un coefficient de traînée basé sur une forme submergée arrondie (valeur typique issue de sources d'ingénierie telles que *EngineeringToolbox*).

L'élévation de la ligne de flottaison est estimée à l'aide de la corrélation suivante inspirée de Faltinsen [10] :

$$\Delta h = k \cdot Fr^2 \cdot L$$

avec :

- $k = 0,052$, ajusté à partir des résultats CFD pour $Fr = 1,22$,
- $Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}}$, le nombre de Froude,
- $L = 1,1 \text{ m}$, la longueur de flottaison du drone,

- $h_0 = 0,05$ m, la hauteur immergée à l'arrêt,
- $b = 0,9$ m, la largeur frontale du drone.

La hauteur immergée dynamique devient $h = h_0 + \Delta h$, et donc :

$$A = b \cdot h$$

Cas à 2 m/s régime semi-déplacement

$$Fr = \frac{2}{\sqrt{9,81 \cdot 1,1}} \approx 0,91$$

$$\Delta h = 0,052 \cdot 0,91^2 \cdot 1,1 \approx 0,0474 \text{ m} \quad \Rightarrow \quad h = 0,05 + 0,0474 = 0,0974 \text{ m}$$

$$A = 0,9 \cdot 0,0974 \approx 0,0877 \text{ m}^2$$

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot 1024 \cdot 2^2 \cdot 0,0877 \cdot 0,32 \approx 57,7 \text{ N}$$

Cas à 3 m/s régime planant

$$Fr = \frac{3}{\sqrt{9,81 \cdot 1,1}} \approx 1,37$$

$$\Delta h = 0,052 \cdot 1,37^2 \cdot 1,1 \approx 0,108 \text{ m} \quad \Rightarrow \quad h = 0,05 + 0,108 = 0,158 \text{ m}$$

$$A = 0,9 \cdot 0,158 \approx 0,1422 \text{ m}^2$$

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot 1024 \cdot 3^2 \cdot 0,1422 \cdot 0,32 \approx 210,5 \text{ N}$$

Comparaison avec les résultats CFD

TABLE 4.2 – Comparaison des forces de traînée estimées (via Δh) et obtenues par CFD

Vitesse	C_D	Surface (m ²)	Δh (m)	Traînée estimée (N)	Traînée CFD (N)
2 m/s	0.32	0.0877	0.0474	57.7	44.3
3 m/s	0.32	0.1422	0.108	210.5	183 – 210

On constate que l'estimation par élévation de la ligne de flottaison donne des valeurs très proches de celles issues de la simulation CFD, notamment à 3 m/s, où la traînée simulée avec un angle de trim de 4° est de 210 N.

Chapitre 5

Réalisation de la coque du drone aquatique de sauvtage

Après avoir défini la géométrie du drone aquatique, évalué ses performances mécaniques par des analyses par éléments finis (Abaqus) et étudié son comportement hydrodynamique via des simulations CFD (Volume of Fluid), il est désormais nécessaire de traduire ces résultats numériques en un prototype physique.

Ce chapitre présente en détail le processus de fabrication de la coque du drone, en suivant une démarche artisanale adaptée aux moyens disponibles. La méthode retenue repose sur l'utilisation d'un moule perdu en polystyrène, sur lequel est réalisé le drapage de plusieurs couches de composite verre/époxy. Cette approche, bien qu'empirique, permet de construire une coque légère, rigide et adaptée aux conditions marines, tout en restant économiquement viable pour un prototype fonctionnel.

L'ensemble des étapes, depuis la préparation du moule jusqu'aux finitions de surface, est décrit de manière rigoureuse afin de garantir la reproductibilité du procédé et la qualité structurelle du prototype final.

5.1 Liste des composants et logistique d'approvisionnement

Avant d'entreprendre la réalisation physique du drone, une étude prévisionnelle des composants nécessaires a été effectuée. Cette étape a permis d'identifier les éléments critiques à acquérir, leurs spécifications techniques, leurs sources d'approvisionnement, ainsi que les estimations budgétaires associées.

Les tableaux suivants présentent, d'une part, la liste des composants sélectionnés avec leurs quantités, poids et coûts, et d'autre part, les sites d'achat correspondants et leur pays d'origine. Cette planification vise à garantir la disponibilité du matériel au moment de la fabrication tout en respectant les contraintes budgétaires du projet.

TABLE 5.1 – Liste prévisionnelle des composants à acquérir pour le prototype

Composant	Quantité	Poids (g)	Prix unitaire (€)	Prix total (€)
Moteur LBP 4074-B-2000KV 2600W	2	374	122.45	245
Contrôleur ZTW Seal 160A	2	130	130	260
Batterie lipo 22000 mah	2	10	–	–
BMS 6s 150A	2		100	200
Propulseur Jet 40mm MSQ	2		75	150
Bague de refroidissement 40x70mm	2		25	50
Total estimé				905 €

TABLE 5.2 – Sites d'achat et pays d'origine des composants

Composant	Site web	Pays d'origine
Moteur LBP 4074-B-2000KV 2600W	https://www.racing-power-boat-rc.com/	France
Contrôleur ZTW Seal 160A	https://www.racing-power-boat-rc.com/	France
Batterie lipo 22000 mah	-	disponible aux niveau des locaux
BMS 6s 150A	https://www.amazon.fr/	France
Propulseur Jet 40mm MSQ	https://www.aliexpress.com/i/33016176690.html	Chine
Bague de refroidissement 40x70mm	https://www.racing-power-boat-rc.com/	France

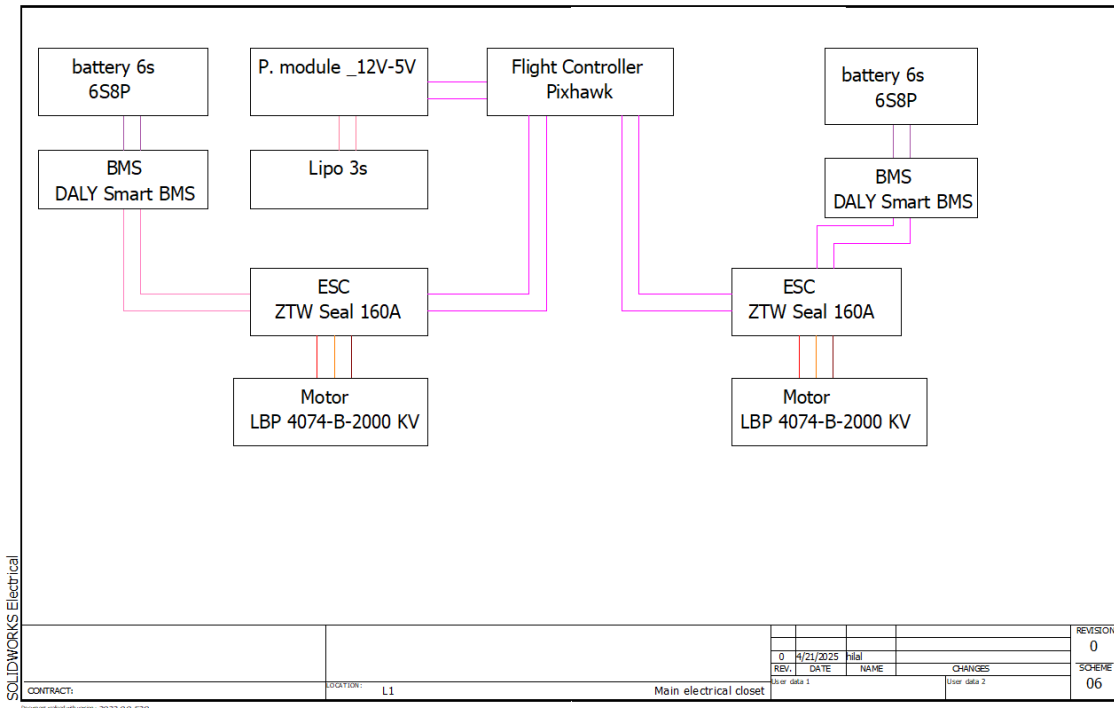


FIGURE 5.1 – Schéma électrique prévisionnel du système de propulsion

5.2 Méthodologie de réalisation de la coque

La réalisation physique de la coque du drone aquatique a nécessité une approche rigoureuse et adaptée aux moyens disponibles en atelier. La méthode choisie est celle du **moule perdu en polystyrène**, une technique fréquemment utilisée dans la fabrication de prototypes composites lorsque la production en série n'est pas envisagée. Cette méthode permet de former la coque directement sur une forme sacrificiable, sans nécessiter de moule réutilisable en matériaux rigides.

1. Conception et réalisation du moule perdu

1.1. Choix du matériau et préparation du bloc

Le matériau retenu pour la fabrication du moule perdu est un bloc de **polystyrène expansé** (EPS), choisi pour sa légèreté, sa facilité d'usinage et son coût réduit. Les dimensions du bloc ont été déterminées en fonction des cotes extérieures du drone, avec une marge suffisante pour les découpes et finitions.

Une mise à niveau du bloc a été effectuée à l'aide d'une **machine à fil chaud**, afin d'obtenir une surface plane et perpendiculaire aux axes principaux, garantissant la précision des profils ultérieurs.

1.2. Simplification géométrique et découpe des profils

La géométrie 3D initiale du drone, conçue sous SolidWorks, a été simplifiée afin de respecter les contraintes du procédé de découpe à fil chaud, qui ne permet que des usinages 2D. Cette simplification a impliqué la réduction de certaines courbures complexes et la définition de sections

planes adaptées au logiciel de découpe.

Les profils ont ensuite été exportés au format **.DXF** pour être importés dans le logiciel **devCNC Foam**, dédié au pilotage de la machine de découpe à fil chaud. Ce logiciel permet d'ajuster les paramètres de coupe, tels que la largeur du fil (kerf), la position initiale, et les facteurs d'échelle.



FIGURE 5.2 – Découpe verticale du profil du moule sur la machine CNC

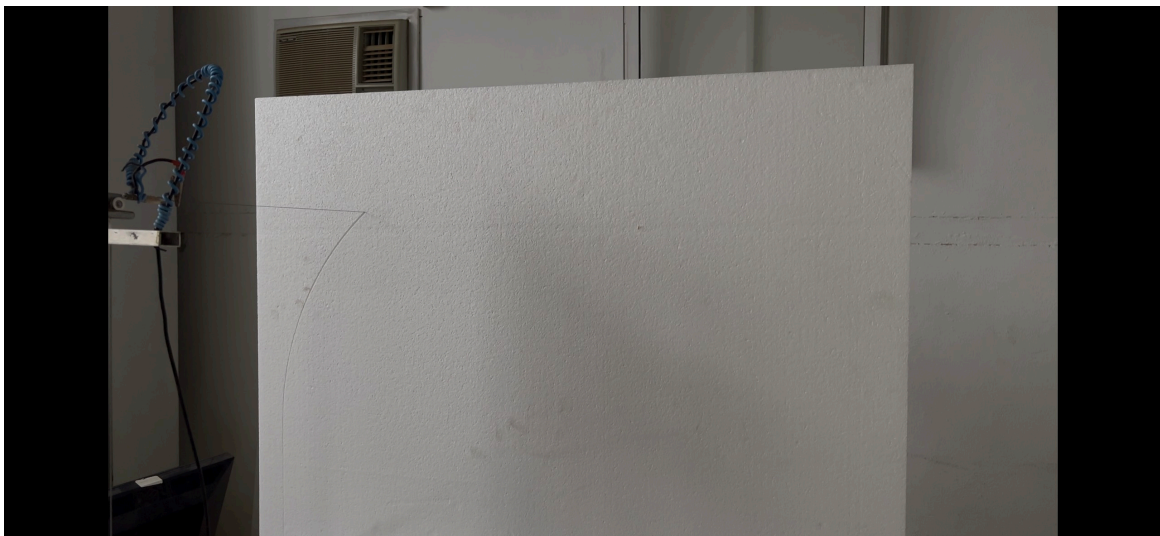


FIGURE 5.3 – Tracé d'un profil courbe représentatif de la coque du drone

Une fois les profils générés et convertis en G-code, la machine à commande numérique a exécuté la découpe des blocs de mousse. Chaque tranche de profil a été réalisée à partir de plaques de polystyrène expansé, puis assemblée pour former le volume complet du moule.



FIGURE 5.4 – Découpe du bloc de mousse par fil chaud selon le tracé défini

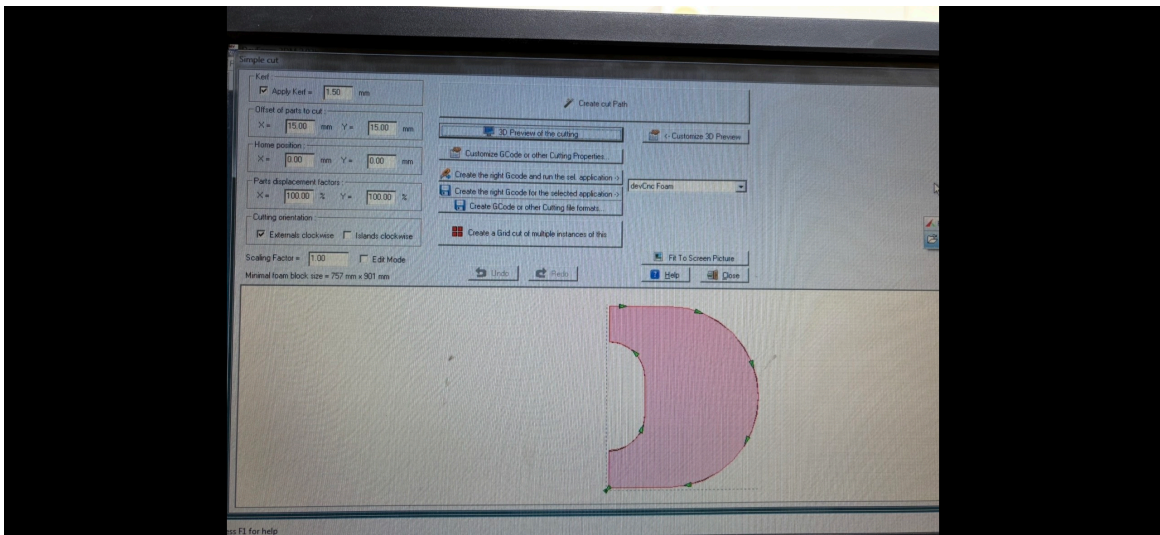


FIGURE 5.5 – Interface de programmation du logiciel de découpe (profil supérieur)

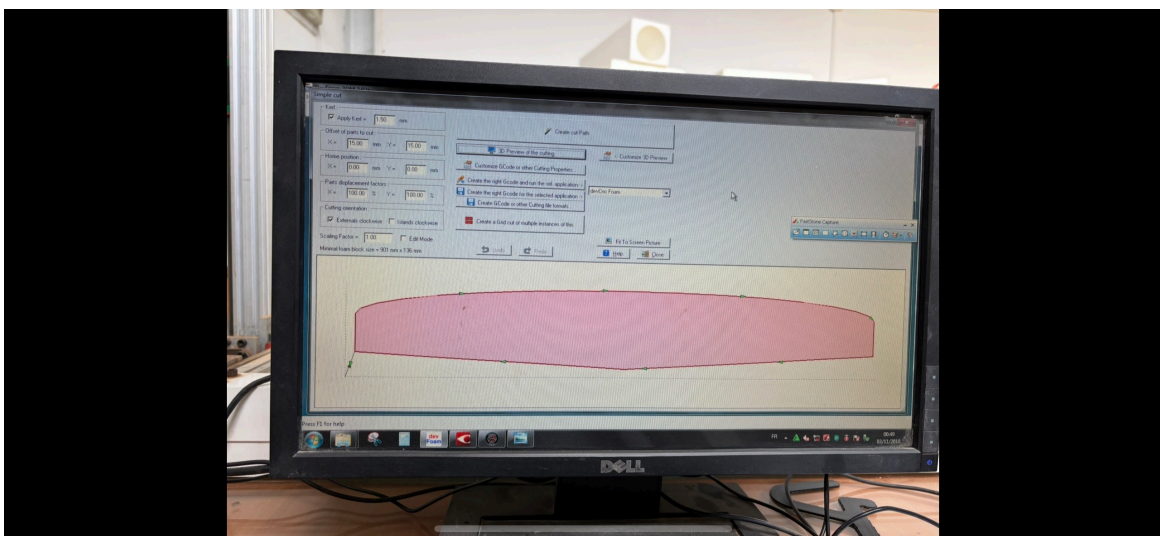


FIGURE 5.6 – Vue latérale du tracé exécuté sur mousse



FIGURE 5.7 – Moule assemblé représentant le volume extérieur de la coque

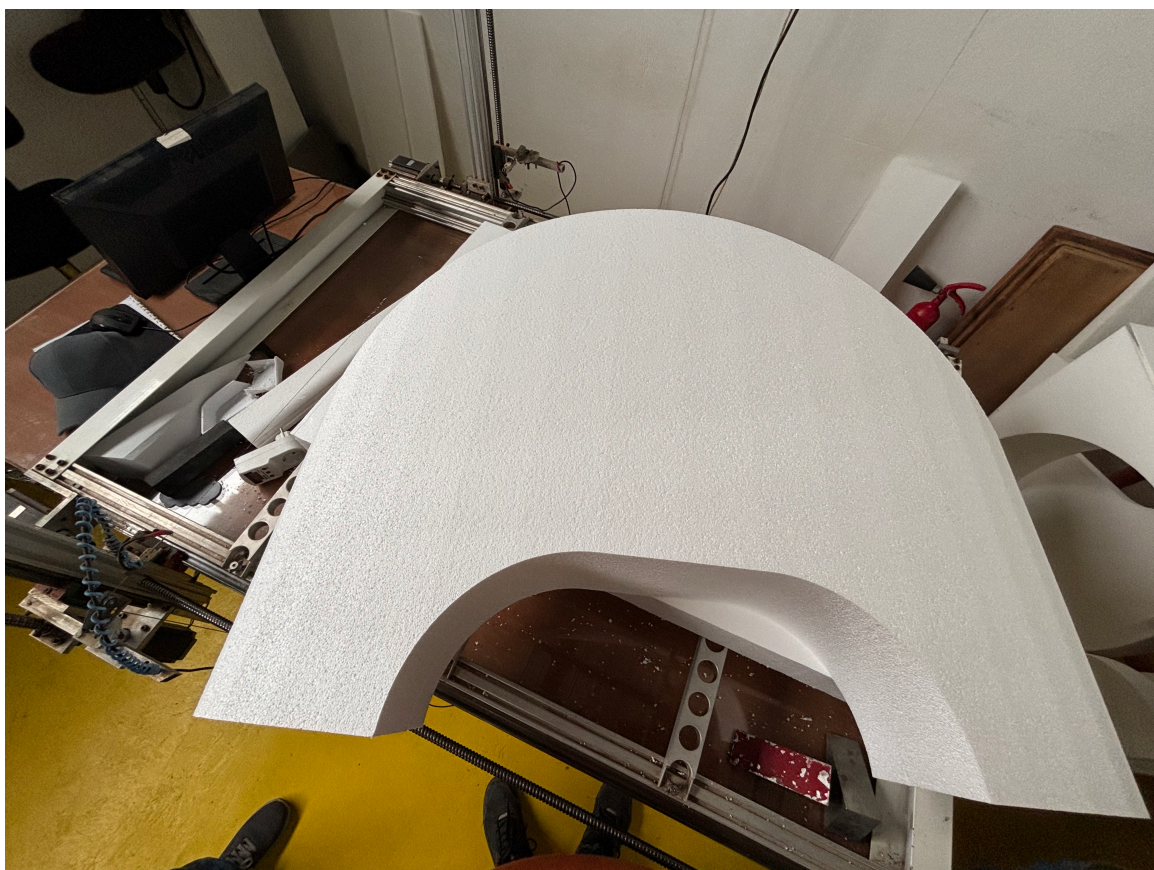


FIGURE 5.8 – Vue d'ensemble du moule complet usiné en mousse

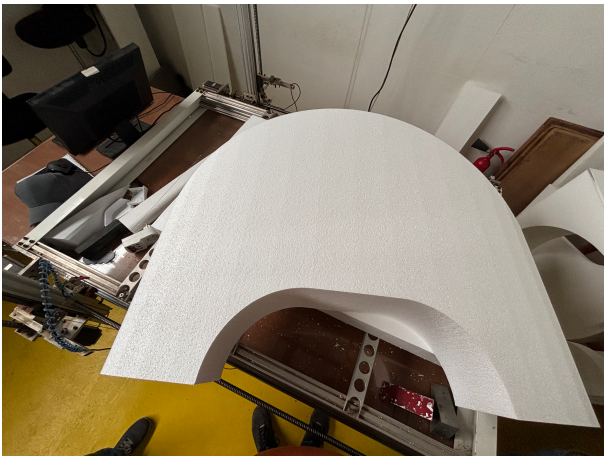
Ce procédé a permis de produire un moule léger, économique et conforme à la géométrie désirée, tout en facilitant la mise en œuvre du stratifié composite dans les étapes ultérieures.

5.2.1 2. Drapage composite de la coque

Une fois le moule en polystyrène finalisé, la fabrication de la coque a été réalisée par la technique du **drapage manuel**. Cinq couches de tissu composite (fibre de verre tissée) ont été successivement appliquées selon le processus suivant :

1. Préparation du moule : nettoyage, ponçage léger, et application éventuelle d'un démoulant ou d'un film plastique.
2. Application de la première couche de résine époxy sur le moule.
3. Dépose de la première couche de tissu de verre et imprégnation à l'aide d'un rouleau débulleur.
4. Répétition du processus pour les cinq couches, en veillant à alterner légèrement les orientations pour une meilleure résistance mécanique.
5. Application d'un film de pelage, d'un tissu d'absorption et mise sous vide pour assurer une bonne compaction (si matériel disponible).

Cette étape a permis d'obtenir une coque monolithique de bonne rigidité, directement formée sur le moule sacrificiable.



(a) Vue latérale de la coque en mousse après découpe CNC.



(b) Vue supérieure montrant les courbures de la structure.

FIGURE 5.9 – Bloc de mousse usiné servant de noyau pour la réalisation du master du drone.

3. Aménagement intérieur et accès aux composants

Une fois la polymérisation achevée, la coque a été retirée avec précaution. Les zones internes destinées à accueillir l'électronique embarquée (batteries, contrôleurs, capteurs) ont été **évidées** à l'aide d'un outil rotatif. Les parties non utilisées ont été laissées pleines pour contribuer à la rigidité structurelle.

Des **trappes d'accès** ont ensuite été découpées dans la coque, en respectant des emplacements définis à l'avance. Ces découpes ont été réalisées manuellement à l'aide d'un cutter chauffant ou d'une scie fine, de manière à préserver l'intégrité de la structure environnante.

4. Étanchéité et finition

Afin d'assurer une protection contre l'eau, une couche de **gelcoat étanche** a été appliquée en finition externe. Le gelcoat, appliqué au pinceau ou au pistolet, forme une barrière imperméable, résistante aux rayons UV et aux sollicitations mécaniques mineures.

Un ponçage fin a été effectué entre les couches pour améliorer l'adhérence et obtenir une surface régulière.

5. Perspectives d'amélioration

Pour des fabrications futures ou une production semi-industrielle, plusieurs améliorations peuvent être envisagées :

- Utilisation d'un **moule rigide réutilisable** pour améliorer la régularité dimensionnelle.
- Passage au **drapage sous infusion** pour une meilleure compaction et un taux de fibre optimisé.
- Intégration de renforts internes (nervures, inserts) dès la phase de drapage.
- Réalisation d'un **jig de découpe** pour les trappes d'accès afin d'uniformiser les ouvertures.

Ces évolutions permettraient de renforcer la qualité structurelle, la reproductibilité et la durabilité du drone, notamment pour une mise en service réelle en milieu marin.

Conclusion générale

Le présent mémoire a porté sur la conception, la modélisation, la simulation et la réalisation partielle d'un **drone aquatique de sauvetage en mer**, répondant à un besoin croissant d'intervention rapide et autonome dans des environnements marins souvent hostiles.

Dans une première phase, un *état de l'art rigoureux* a permis de cerner les enjeux actuels du sauvetage maritime et d'identifier les limitations des dispositifs existants. Cette analyse a mis en évidence le potentiel des drones de surface autonomes pour améliorer la rapidité, la sécurité et l'efficacité des opérations de secours en mer.

Sur le plan technique, le projet s'est articulé autour d'une *approche pluridisciplinaire*, intégrant :

- la sélection et la caractérisation de matériaux composites, adaptés à l'environnement marin.
- des essais mécaniques expérimentaux en traction et en flexion.
- une étude structurelle par la méthode des éléments finis (ANSYS) pour valider la résistance de la coque.
- ainsi qu'une analyse hydrodynamique avancée par simulation CFD multiphasique (méthode VOF), permettant d'évaluer les efforts de traînée et de portance dans des conditions réalistes.

La phase finale a permis de **réaliser un prototype partiel** de la coque en matériaux composites, validant les choix géométriques et technologiques retenus. Les résultats expérimentaux ont montré une bonne corrélation avec les simulations numériques, ce qui renforce la confiance dans les performances du système conçu.

Ce projet de fin d'études représente une **contribution concrète à la robotique de secours maritime**, en proposant une solution technologique innovante, accessible et robuste. Il constitue également un excellent socle pour une *poursuite en recherche appliquée ou en développement industriel*, dans un domaine où l'ingénierie est mise au service direct de la vie humaine.

Apports et originalité

Ce travail se distingue par :

- une intégration complète de la chaîne numérique (CAO simulation fabrication),
- une validation croisée entre modélisation et essais physiques,
- un positionnement réaliste dans un contexte opérationnel, avec une prise en compte des normes, de la sécurité fonctionnelle, et des contraintes marines.

Perspectives d'amélioration et évolutions futures

Bien que de nombreuses avancées aient été réalisées au cours de ce projet, certains aspects restent à approfondir pour une mise en œuvre complète. L'intégration des systèmes électroniques embarqués, le développement de la navigation autonome ainsi que la réalisation de essais en environnement réel représentent des axes importants à poursuivre.

À moyen et long terme, plusieurs pistes d'amélioration peuvent être envisagées :

- l'intégration d'algorithmes d'intelligence artificielle pour optimiser la détection et la navigation autonome,
- la mise en place d'une chaîne de communication sécurisée pour le pilotage à distance,
- et la miniaturisation de certains composants afin d'accroître l'autonomie et la portabilité du système.

Ces évolutions permettront de renforcer la fiabilité, l'efficacité et l'adaptabilité de la solution développée dans des contextes opérationnels variés.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Organisation mondiale de la santé. La noyade : un problème de santé publique mondiale. <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/drowning>, 2021. Consulté le 15 juin 2025.
- [2] Jin Park, Min Lee, and Soo Kim. Development of autonomous water rescue robot. *Ocean Engineering*, 237:109602, 2021.
- [3] Blue Robotics. Bluerov2 technical white paper. <https://bluerobotics.com>, 2022. Accessed : 2025-06-15.
- [4] Ming Gao and Rui Chen. Human detection for maritime search. *Sensors*, 22(3) :789, 2022.
- [5] David Carrasco and Alberto Ruiz. Hybrid uav-usv search systems. *Mechatronics*, 87:102891, 2023.
- [6] Elena Munoz and Raj Patel. Cybersecurity in maritime drones. *IEEE Communications Magazine*, 61(5) :94--101, 2023.
- [7] Ittc recommended procedures and guidelines, 7.5-02-02-01: Resistance test. Technical Report Revision 03, 26th International Towing Tank Conference (ITTC), Copenhagen, Denmark, 2011. Effective date : 05/2011. Approved by the 26th ITTC Resistance Committee.
- [8] Sasan Tavakoli, Mingyang Zhang, Aleksander A. Kondratenko, and Spyros Hirdaris. A review on the hydrodynamics of planing hulls. *Ocean Engineering*, 263:112204, 2022.
- [9] Britannica. Metacentric stability. <https://www.britannica.com/technology/naval-architecture/Metacentric-stability>. Accessed June 2025.
- [10] Odd M. Faltinsen. *Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2005.
- [11] Ross Vennell, Dave Pease, and Barry Wilson. Wave drag on human swimmers. *Journal of Biomechanics*, 39(4) :664--671, 2006.
- [12] P. K. Mallick. *Fiber-Reinforced Composites : Materials, Manufacturing, and Design*. CRC Press, 3rd edition, 2007.
- [13] V. Karpman. Marine applications of composites. In R. D. Adams, editor, *Composites in Marine Structures*, pages 13--45. Elsevier, 2015.
- [14] A. Dupont and B. Martin. Marine application of fiber reinforced composites : A review. *Journal of Marine Engineering*, 45:123--145, 2021.
- [15] C. Nguyen and D. Lee. Recent industrial developments of marine composites : Limit states and fiber selection. *Composite Structures*, 250:112789, 2022.
- [16] IFREMER. Evaluation of new composite materials for marine applications. Technical report, Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer.

- [17] G. Patel and H. Zhang. A review assessment of fiber-reinforced polymers for maritime applications. *International Journal of Naval Architecture*, 8:56--75, 2020.
- [18] E. Silva and F. Ramos. Sustainable polymer composite marine structures a review. *Marine Materials Today*, 12:78--102, 2023.
- [19] F. C. Campbell. *Manufacturing Processes for Advanced Composites*. Elsevier, 2003.
- [20] William D. Callister and David G. Rethwisch. *Materials Science and Engineering : An Introduction*. Wiley, 10th edition, 2018.
- [21] Plastics determination of tensile properties part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites. International Standard ISO 527-4:2021, 2021. <https://www.iso.org/standard/81008.html>.
- [22] Fibre-reinforced plastic composites – determination of flexural properties. International Standard ISO 14125:1998, 1998. <https://www.iso.org/standard/23250.html>.
- [23] Isaac M. Daniel and Ori Ishai. *Engineering Mechanics of Composite Materials*. Oxford University Press, 2nd edition, 2006.
- [24] ABSA. Fea requirements in design survey. Technical report, ABSA Finite Element Analysis Guidelines, 2023. Edition2, Revision0, p.2.
- [25] Isaac M. Daniel and Ori Ishai. *Engineering Mechanics of Composite Materials*. Oxford University Press, New York, 2nd edition, 2005.
- [26] M. Nowicki and S. Pusz. Modelling of selected properties of glass/epoxy composites using micromechanics. *Composites Theory and Practice*, 16(4) :218--222, 2016.

Annexe

Annexe A

Annexe

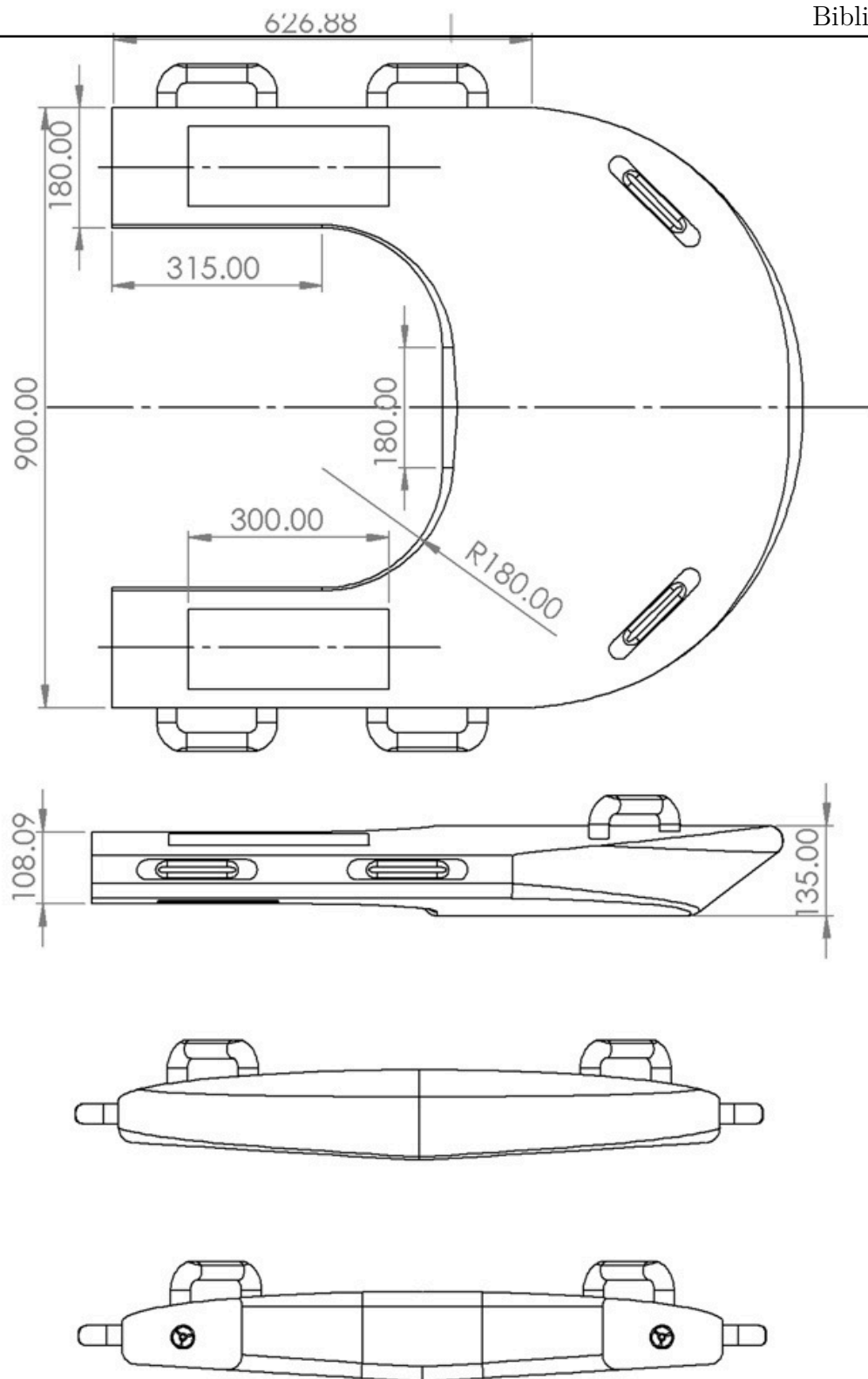
Les propriétés mécaniques suivantes ont été utilisées dans les simulations :

- Module de cisaillement $G_{12} = 4.5 \text{ GPa}$
- Coefficient de Poisson $\nu_{12} = 0.3$

Ces valeurs sont compatibles avec celles mentionnées dans la littérature scientifique :

1. **Daniel, I. M., Ishai, O. (2005). Engineering Mechanics of Composite Materials (2nd ed.). Oxford University Press** : Le module de cisaillement pour les composites verreépoxy tissés est typiquement situé entre 4 GPa et 6 GPa, avec un coefficient de Poisson avoisinant 0.3.[25]
2. **Composites Theory and Practice, Vol. 16, Issue 4 (2016)** : Une étude expérimentale sur les stratifiés verreépoxy à 50% de volume de fibres indique un G_{12} de 4.3 GPa à 5.6 GPa selon l'orientation, confirmant la validité de la valeur adoptée.[26]

Dessin de définition



ECOLE

NATIONALE

POLYTECHNIQUE

ALGER

ECHELLE

1:10

ETUDIANT

BOUAOUD

ETUDIANT

BENLOUNES

PROMOTEUR

ZEROUDI

PROMOTEUR

KECHIDA

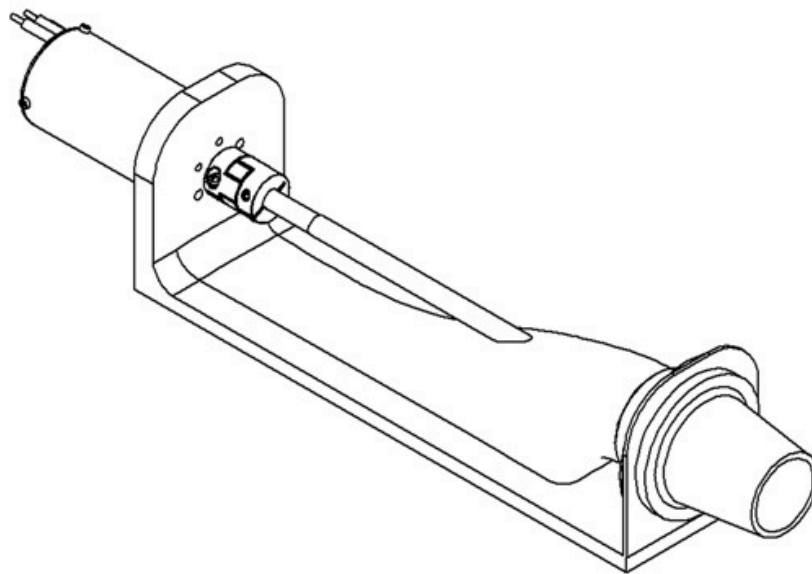
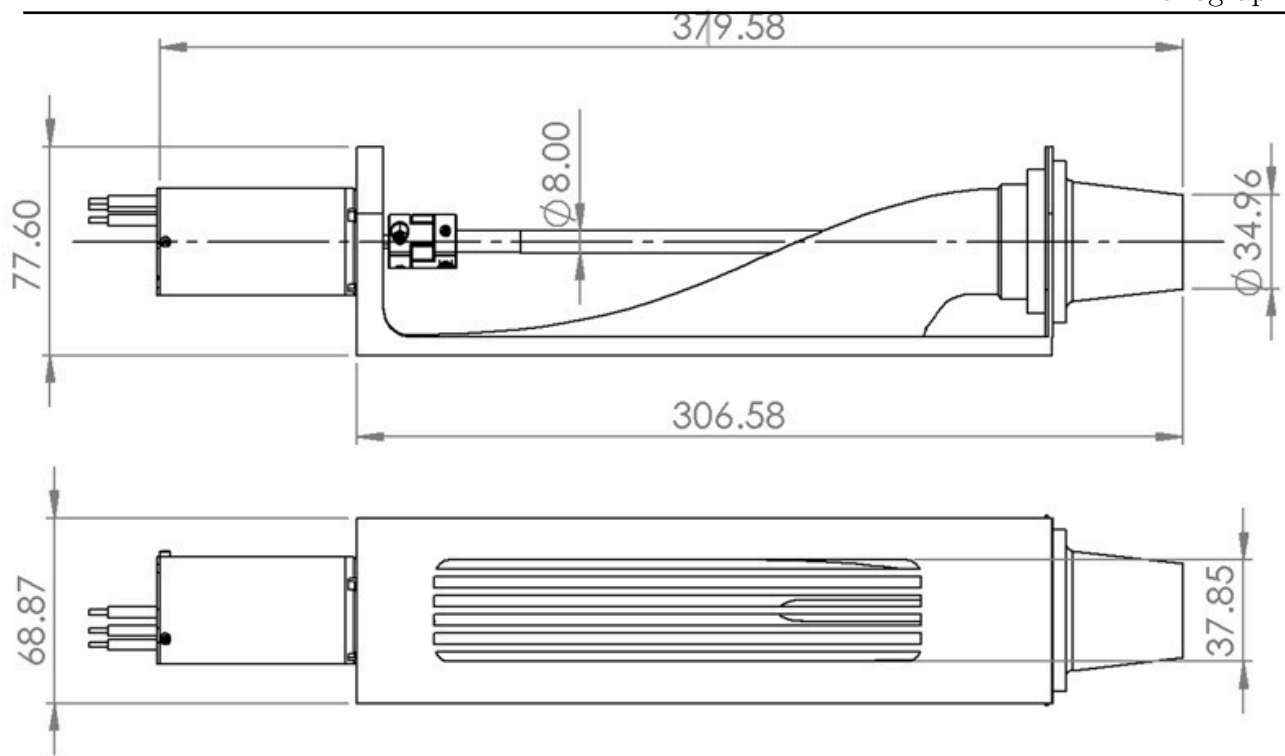
MATERIAU

Fibre de verre

Assemblage Drone

ENP
DEPARTEMENT
G. MECANIQUE

01/06/2025



ECOLE

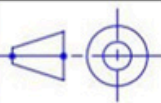
NATIONALE

POLYTECHNIQUE

ALGER

ECHELLE

1:3



ETUDIANT

BOUAUD

ETUDIANT

BENLOUNES

PROMOTEUR

ZEROUDI

PROMOTEUR

KECHIDA

MATERIAU

PLA

Assemblage
Propulsion à jet d'eau

ENP
DEPARTEMENT
G. MECANIQUE

01/06/2025