



Laboratoire de Mécanique et Génie Civil
UMR - 5508 , UM/CNRS

Projet ASV-Mobula - 181514

Rapport Scientifique intermédiaire

Année : 2019-2020

Type de projet

FEDER-FSE-IEJ 2014-2020

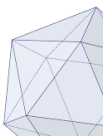
Équipes

Auteurs
Pr. Loïc Daridon

Pr. S. Dumont (IMAG)
M. A. Fuchs (Correspondant Sea Proven)
Mc. K. Godary-Dejean (LIRMM)
Pr. L. Latorre (LIRMM)
Mc. L. Lapierre (LIRMM)
Mc. T. Martiré (IES)
Pr. D. Matt (IES)



IMAG
INSTITUT MONTPELLIERAIN
ALEXANDER GROTHENDIECK



4 juin 2021

Résumé

Après le développement des drones aériens qui sont maintenant utilisés pour de multiples activités, les drones marins, notamment les drones de surface (ASV-Mobula) sont peu à peu en train de compléter un nombre varié de missions. De la surveillance des activités humaines (sécurité, exploitation off-shore, défense, zones protégées,...) à celle de l'environnement (relevés océanographiques, surveillance et suivi de la faune marine, zones de pêche,...) de nombreuses missions peuvent maintenant être accomplies par ces « bateaux » d'un nouveau type, fonctionnant d'une façon autonome.

Ce projet vise à mutualiser les compétences de plusieurs laboratoires de l'UM et leurs partenaires pour développer un engin de surface très innovant associant une plateforme à foils, une propulsion vélique et l'autonomie énergétique. Ce projet s'appuie notamment sur les développements autour d'engin de surface ayant 4 foils articulés. Rappelons ici que les foils présentent deux avantages majeurs : 1- ils réduisent fortement la traînée (résistance à l'avancement) puisque la coque n'est plus dans l'eau et 2- ils évitent le tangage et le roulis puisque le bateau « vole » à plat sur l'eau (jusqu'à une certaine hauteur de houle). La propulsion vélique est assurée par une aile rigide robotisée dont le développement de cette solution s'appuie sur le savoir faire du LIRMM en matière de robots à câble. L'étude des aspects énergétiques de ce projet s'appuie sur les compétences développées au sein de l'IES.

Table des matières

1	Introduction	1
2	Lot1	3
2.1	Ressources humaines	3
2.2	Réglementation et collect de données	4
2.2.1	Approche du cadre réglementaire concernant les drones marins	4
2.2.1.1	Le contexte administratif et juridique	4
2.2.1.2	ASV-Mobula dans le contexte des drones maritimes	5
2.2.1.3	Distinction entre navires autonomes et drones maritimes :	7
2.2.1.4	Le protocole « mer & espace » au cœur de la démarche scientifique opérationnelle de l'ASV-Mobula	8
2.2.1.5	L'expérience des missions Sphyrna Odyssée de Seaproven, partenaire du projet ASV-Mobula : Référentiel partenarial	9
2.2.1.6	La collecte de données et les capteurs embarqués de l'ASV-Mobula . .	11
2.3	Brevet	12
2.4	Industrialisation et partenariat	12
3	Lot2	13
3.1	Calculs Hydros et Aéro	13
3.1.1	Choix du profil	14
3.1.1.1	Préselection de profils	14
3.1.1.2	Résultats	14
3.1.1.3	Conclusion	16
3.1.2	Étude 3D des efforts sur l'aile	17
3.1.2.1	Cadre de l'étude	17
3.1.2.2	Résultats	19
3.1.2.3	Conclusions	20
3.2	Études hydrodynamiques	21
3.2.1	Calcul de la surface portante théorique de chaque hydrofoil	21
3.2.1.1	Hypothèses et critères	21
3.2.1.2	Théorie des lignes portantes	21
3.2.1.3	Application numérique	22
3.2.2	Simulations de l'écoulement autour d'un hydrofoil en monofluide	24
3.2.2.1	Modélisation	24
3.2.2.2	Domaine de calcul	24
3.2.2.3	Maillage	24
3.2.2.4	Paramètres de simulation	24
3.2.2.5	Cas testés	25
3.2.2.6	Résultats	25
3.2.2.7	Comparaison des résultats des simulations numériques à ceux obtenus à partir de la théorie de la Ligne Portante	25
3.2.2.8	Calcul de la surface portante nécessaire	25

3.2.3	Simulations de l'écoulement autour de deux hydrofoils en monofluide	29
3.2.3.1	Modélisation	29
3.2.3.2	Domaine de calcul	29
3.2.3.3	Maillage	29
3.2.3.4	Paramètres de simulation	29
3.2.3.5	Cas testés	29
3.2.3.6	Résultats	30
3.2.3.7	Analyse	30
3.2.4	Simulations de l'écoulement autour de deux hydrofoils avec prise en compte de la surface libre	32
3.2.4.1	Modélisation	32
3.2.4.2	Domaine de calcul	32
3.2.4.3	Maillage	32
3.2.4.4	Paramètres de simulation	32
3.2.4.5	Cas testés	33
3.2.4.6	Résultats	33
3.2.4.7	Analyse	33
3.2.5	Simulation de l'écoulement autour des parties immergées d'un demi-catamaran avec prise en compte de la surface libre	34
3.2.5.1	Modélisation	34
3.2.5.2	Domaine de calcul	34
3.2.5.3	Maillage	34
3.2.5.4	Paramètres de simulation	36
3.2.5.5	Résultats	36
3.3	Simulateurs Mobula	38
3.4	Conceptions	39
3.4.1	Design de l'aile robotisée	39
3.4.2	Design de la plateforme à 4 foils	40
3.4.2.1	les solutions technologiques pour l'articulation des foils	40
4	Lot3	43
4.1	Propulsion électrique	43
4.2	Génération d'énergie photovoltaïque	46
4.2.1	Organisation du générateur photovoltaïque	48
4.2.1.1	Caractérisation des panneaux photovoltaïques	49
4.2.1.2	Les effets de l'angle d'inclinaison sur la puissance disponible	50
4.2.1.3	Les effets de la température sur la puissance disponible	50
4.2.1.4	Les effets de l'ensoleillement et des ombrages sur la puissance disponible	51
4.2.1.5	Caractéristiques du générateur complet	52
4.2.1.6	Conclusions	53
4.2.2	Architecture du système de conversion	53
4.2.2.1	batterie connectée directement au bus de distribution	54
4.2.2.2	Association de convertisseurs sur un bus de distribution commun.	55
4.2.2.3	Brique élémentaire du système de conversion	58
4.2.2.4	Echanges par transformateur spécial	59
4.2.2.5	conclusion	59
4.2.3	Conclusion production d'énergie	60
5	Lot4	69
5.1	Régulation	69
5.1.1	Modélisation dynamique de Mobula	70
5.1.2	Structure de commande (S)-NGC-A	71
5.1.3	Conception de la commande	72
5.1.3.1	Stabilisation de l'assiette du système et contrôle de vol	73

5.1.3.2	Contrôle de la trajectoire	76
5.1.4	Planification de chemin	77
5.1.4.1	Panneau Solaire	77
5.1.4.2	Moteur électrique réversible	77
5.1.4.3	Propulsion vélique	77
5.1.4.4	Fonction d'optimisation	80
5.2	Électronique de Commande	80
6	Point d'avancement et Perspectives à moyen terme	81
A	Annexes Lot1	83
A.1	annexe1	83
A.2	Présentation du projet ASV-Mobula lors de l'évaluation du LMGC par l'HCERES . .	84
B	Annexes Lot2	85
B.1	Les efforts aérodynamique sur l'aile	85
B.2	Les polaires sous forme graphiques	91
B.3	Les maillages calcul hydrodynamique : 1 fluide, 1 foil	97
B.4	Les maillages calcul hydrodynamique : 1 fluide, 2 foils	99
B.5	Les maillages calcul hydrodynamique :2 fluides, 2 foils	103
B.6	Les maillages pour les calculs hydrodynamiques : Catamaran , 2 fluides	106
C	Annexes Lot4	108
C.1	Simulations de la plateforme à 4 foils	108

Liste des Figures

3.1	Exemple d'une planche munie d'un hydrofoil et tracté par une aile (<i>kite</i>). Crédits https://www.radicalsurfex.com/foto-foil-takoon-zeta/	13
3.2	Principe de fonctionnement du bateau Vesta SailRocket. Crédits N. Cailloux - https://www.windsurfing33.com/forum/viewtopic.php?f=42&t=120625/	14
3.3	Coordonnées des quatre profils sélectionnés	16
3.4	Angles de Cardan	18
3.5	Schéma du domaine de calcul	19
3.6	Visualisation d'une coupe en $Y = 0$ m d'un exemple de maillage, pour un domaine orienté avec les angles de Cardan $\psi = 60^\circ$, $\theta = 10^\circ$ et $\phi = 0^\circ$, et ajout de l'aile rigide (en orange).	20
3.7	Tracé de la courbe donnant le rapport $\frac{AR}{AR+2}$ en fonction de l'allongement AR (<i>aspect ratio</i>).	21
3.8	Courbe du coefficient de portance C_l du profil H105 en fonction de l'angle d'incidence α obtenu par simulation numérique avec FINE/Marine pour une vitesse $U = 5$ kn, une corde $c = 16$ cm, une masse volumique $\rho = 998,4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ et une viscosité dynamique $\mu = 1,04362 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$	23
3.9	Tracé des coefficients de portance C_l obtenus par simulations numériques (en noir) et $C_{l, \text{éval.}}$ obtenus par évaluation théorique (en rouge) pour différentes valeurs d'allongement AR	27
3.10	Tracé de la portance L obtenue pour un angle d'attaque $\alpha = 5^\circ$ en fonction de l'envergure b de l'hydrofoil.	28
3.11	Tracé des portances L sur les foils avant (AV) et arrière (AR) obtenues pour un foil AV positionné à une distance $h = 1,032$ m de la surface libre et pour un foil AR écarté de Δz par rapport au foil AV.	30
3.12	Tracé des portances L sur les foils avant (AV) et arrière (AR) obtenues pour une distance h à la surface libre, commune aux deux foils.	33
3.13	Vues du domaine de calcul utilisé pour la simulation de l'écoulement autour des parties immergées du demi-catamaran.	35
3.14	Vue du maillage utilisé pour la simulation de l'écoulement autour des parties immergées du demi-catamaran.	35
3.15	Lois de mouvement imposées au demi-catamaran.	36
3.16	Vue du champ de vagues autour du catamaran	37
3.17	Simulation de l'ASV	38
3.18	Modèle CAO de l'ASV-Mobula	39
3.19	Modèle CAO du P.O.C. de l'aile robotisée	40
3.20	Modèle CAO des treuilles	40
3.21	Schéma de fonctionnement de principe de l'actionnement des foils	40
3.22	Plateforme en date du 30 septembre 2020	41
3.23	Plateforme en date du 30 Avril 2021	41
3.24	Modélisation de la Plateforme prévue pour Juillet 2021	42
4.1	Bobinage à barre massive(à gauche) versus bobinage à fils (à droite)	43

4.2	Bobinage à un seul conducteur par encoche	44
4.3	Réalisation pratique du bobinage à barres à cylindres	44
4.4	Prototype 4,5 kW	45
4.5	Courbe de rendement du moteur 4,5 kW	45
4.6	Contrôleur d'alimentation adapté aux moteurs développés.	46
4.7	Dessin Rotor turbine	46
4.8	Maquette Rotor turbine	47
4.9	Le Panneau solaire choisi	48
4.10	organisations possibles du générateur avec 4 panneaux. (a) association en série, (b) association en parallèle, et de (c) association série-parallèle	49
4.11	Schéma de la méthode de mesure des caractéristiques des panneaux solaires	49
4.12	Courbes temporelles obtenues pour un ensoleillement de 850 W/m^2	49
4.13	Influence de l'angle panneau pour un ensoleillement théorique de 850 W/m^2	50
4.14	caractéristiques $P(V)$ pour 850 W/m^2 et deux angles d'inclinaison différent	50
4.15	caractéristiques $P(V)$ et $I(V)$ pour 980 W/m^2	51
4.16	Effets de l'ensoleillement sur les caractéristiques	51
4.17	Effets des ombrage ou des défauts de cellules sur la caractéristique des cellules	52
4.18	Assemblages série ou parallèle de panneaux	52
4.19	Comparaison entre les différents type de montages série/parallèle des panneaux	53
4.20	Organisation du système avec batterie connectée au bus continu	54
4.21	Schéma simulink de simulation	55
4.22	Caractéristiques du modèle de générateur photovoltaïque utilisé dans la simulation	56
4.23	Profil d'ensoleillement utilisé pour la simulation	56
4.24	Résultats obtenus à partir de la simulation Simulink	57
4.25	Schéma de convertisseurs et de sources partageant un bus commun de distribution	57
4.26	Schéma PSIM de simulation du système de gestion d'Energie	61
4.27	Seul le générateur photovoltaïque débite de la puissance	62
4.28	Le générateur photovoltaïque fourni son maximum de puissance et la batterie débite le reste de puissance pour alimenter une charge 860W	63
4.29	Le générateur photovoltaïque fourni sa puissance maximale, la batterie absorbe la puissance, les moteurs fonctionnent en génératrice et injectent de la puissance sur le bus continu	64
4.30	Le générateur photovoltaïque fourni sa puissance maximale, la batterie absorbe la puissance, les moteurs fonctionnent en génératrice et injectent de la puissance sur le bus continu	64
4.31	Le générateur photovoltaïque fourni sa puissance maximale, la batterie absorbe la puissance, les moteurs fonctionnent en génératrice et injectent de la puissance sur le bus continu	65
4.32	Le générateur photovoltaïque fourni sa puissance maximale, la batterie absorbe la puissance, les moteurs fonctionnent en génératrice et injectent de la puissance sur le bus continu	65
4.33	Le générateur photovoltaïque fourni sa puissance maximale, la batterie absorbe la puissance, les moteurs fonctionnent en génératrice et injectent de la puissance sur le bus continu	66
4.34	Le générateur photovoltaïque fourni sa puissance maximale, la batterie absorbe la puissance, les moteurs fonctionnent en génératrice et injectent de la puissance sur le bus continu	67
4.35	Le générateur photovoltaïque fourni sa puissance maximale, la batterie absorbe la puissance, les moteurs fonctionnent en génératrice et injectent de la puissance sur le bus continu	67
4.36	Le générateur photovoltaïque fourni sa puissance maximale, la batterie absorbe la puissance, les moteurs fonctionnent en génératrice et injectent de la puissance sur le bus continu	68

5.1	Notations	71
5.2	Schéma de principe de la structure de commande S-NGC-A	72
5.3	Structure de la Commanbde	73
5.4	Evolution de l'état du système (haut) et sa trajectoire résultante (bas), sans foils . . .	75
5.5	Les organes actifs de Mobula	78
5.6	Modèle de production électrique du panneau solaire	78
5.7	Modèle du moteur réversible propulseur/ghydrogénérateur	79
5.8	Définition du vent apparent et des allures du bateau	79
5.9	Simulateur des allures du bateau et des organes de production/consommation électrique	79
5.10	Simulateur des allures du bateau et des organes de production/consommation électrique	80
B.1	Evolution des forces (a) de traînée et (b) de portance et (c) du moment de tangage en fonction de la vitesse du fluide U pour une aile droite de corde $c = 1,5$ m, d'envergure $s = 2$ m et pour l'ensemble des profils préselectionnés.	86
B.2	Evolution des forces (a) de traînée et (b) de portance et (c) du moment de tangage en fonction de la vitesse du fluide U pour une aile droite de corde $c = 1,5$ m, d'envergure $s = 2$ m et générée par le profil NACA 4418.	87
B.3	Evolution des forces (a) de traînée et (b) de portance et (c) du moment de tangage en fonction de la vitesse du fluide U pour une aile droite de corde $c = 1,5$ m, d'envergure $s = 2$ m et générée par le profil Göttingen 693.	88
B.4	Evolution des forces (a) de traînée et (b) de portance et (c) du moment de tangage en fonction de la vitesse du fluide U pour une aile droite de corde $c = 1,5$ m, d'envergure $s = 2$ m et générée par le profil FlexiBlade 4.9.	89
B.5	Evolution des forces (a) de traînée et (b) de portance et (c) du moment de tangage en fonction de la vitesse du fluide U pour une aile droite de corde $c = 1,5$ m, d'envergure $s = 2$ m et générée par le profil Sputnik 4.	90
B.6	Graphiques polaires affichant la norme F_{xy} de la composante horizontale de la résultante aérodynamique sur l'aile rigide en fonction de l'angle de lacet ψ , pour des valeurs fixées de l'angle de roulis ϕ et de tangage θ . De gauche à droite, ϕ croît de 0° à 20° . De bas à haut, θ croît de -10° à 20°	91
B.7	Graphiques polaires affichant la composante verticale F_z de la résultante aérodynamique sur l'aile rigide en fonction de l'angle de lacet ψ , pour des valeurs fixées de l'angle de roulis ϕ et de tangage θ . De gauche à droite, ϕ croît de 0° à 20° . De bas à haut, θ croît de -10° à 20°	92
B.8	Graphiques polaires affichant l'angle α entre le vecteur vitesse $\vec{U}$ et le vecteur $\vec{F}_{xy}$ de la composante horizontale de la résultante aérodynamique sur l'aile rigide en fonction de l'angle de lacet ψ , pour des valeurs fixées de l'angle de roulis ϕ et de tangage θ . De gauche à droite, ϕ croît de 0° à 20° . De bas à haut, θ croît de -10° à 20°	93
B.9	Graphiques des courbes de niveaux de la norme F_{xy} de la composante horizontale de la résultante aérodynamique sur l'aile rigide en fonction des angles de roulis ϕ et de tangage θ , pour des valeurs fixées de la vitesse du vent U et de l'angle de lacet ψ . De bas en haut, U croît de $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ à $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. De gauche à droite, ψ croît de 0° à 90°	94
B.10	Graphiques des courbes de niveaux de la composante verticale F_z de la résultante aérodynamique sur l'aile rigide en fonction des angles de roulis ϕ et de tangage θ , pour des valeurs fixées de la vitesse du vent U et de l'angle de lacet ψ . De bas en haut, U croît de $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ à $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. De gauche à droite, ψ croît de 0° à 90°	95
B.11	Vues d'un exemple de maillage utilisé pour les simulations de l'écoulement autour d'un hydrofoil en monofluide (eau seulement).	96
B.12	Vues d'un exemple de domaine de calcul utilisé pour les simulations de l'écoulement autour d'un hydrofoil en monofluide (eau seulement).	98
B.13	Vues d'un exemple de domaine de calcul utilisé pour les simulations de l'écoulement autour de deux hydrofoils en monofluide (eau seulement).	100
B.14	Vues d'un exemple de maillage utilisé pour les simulations de l'écoulement autour de deux hydrofoils en monofluide (eau seulement).	101

B.15	Affichage de dix lignes de courant montrant l'écoulement (en monofluide) autour des deux hydrofoils et des lignes de niveaux de pressions saturées à ± 500 Pa.	102
B.16	Vues d'un exemple de maillage utilisé pour les simulations de l'écoulement autour de deux hydrofoils avec prise en compte de la surface libre. Les hydrofoils sont immergées à une profondeur $h = 1,032$ m.	104
B.17	Affichage de neuf lignes de courant montrant l'écoulement, prenant en compte la surface libre, autour des deux hydrofoils et des lignes de niveaux de fraction volumique en eau.	105
B.18	Vues du domaine de calcul utilisé pour la simulation de l'écoulement autour des parties immergées du demi-catamaran.	107
C.1	Evolution de l'état du système (haut), trajectoire résultante (bas-gauche) et l'activité des foils (bas-droit), sans guidage	109
C.2	Evolution de l'état du système (haut), trajectoire résultante (bas-gauche) et l'activité des foils (bas-droit), avec guidage	110
C.3	Evolution de l'état du système (haut), trajectoire résultante (bas-gauche) et l'activité des foils (bas-droit), avec guidage, en imposant $\delta_{B,p} = -0.1rad$ à partir de $t = 6s$. . .	111

Liste des Tableaux

3.1	Liste des profils préselectionnés pour le dimensionnement de l'aile	15
3.2	Classement des profils en quatre familles et sélection d'un profil représentatif de chaque famille	15
3.3	Comparaison des portances obtenues à un angle d'attaque $AoA = 10^\circ$ pour les profils NACA 4418, Göttingen 693, FlexiBlade 4.9 et Sputnik 4, pour des vitesses de 5 kn à 40 kn	17
3.4	Valeurs du jeu de paramètres de l'étude.	18
3.5	Constantes utilisées dans ce rapport.	23
3.6	Valeurs tabulées du coefficient de portance C_l du profil H105 en fonction de l'angle d'incidence α obtenu par simulation numérique avec FINE/Marine pour une vitesse $U = 5$ kn, une corde $c = 16$ cm, une masse volumique $\rho = 998,4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ et une viscosité dynamique $\mu = 1,04362 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$	23
3.7	Ensemble des valeurs de paramètres utilisés pour l'incidence α de l'hydrofoil et de son envergure b dans les simulations de l'écoulement autour d'un hydrofoil en monofluide .	25
3.8	Traînée, portance et moment de tangage au quart de corde, et les trois coefficients correspondants, exercés sur l'hydrofoil pour sept valeurs d'envergure b et trois angles d'incidence α	26
3.9	Ensemble des valeurs de paramètres utilisés pour l'incidence α des hydrofoils et de la différence de position verticale Δz du foil arrière (AR) par rapport au foil avant (AV) pour les simulations de l'écoulement autour de deux hydrofoils en monofluide	29
3.10	Variation de portance suite à la modification de l'angle d'incidence α du foil arrière. .	31
3.11	Quatre valeurs d'immersion utilisées pour les simulations de l'écoulement autour de deux hydrofoils avec la prise en compte de la surface libre.	33
3.12	Valeurs convergées des forces de traînée et portance et moment de tangage obtenus à l'issue des phases d'accélération du catamaran et de mise en vol.	37
5.1	valeur des gains de contrôle	74
5.2	Paramètres des fonctions de guidage	76

1 - Introduction

Ce projet vise à développer un engin de surface très innovant associant une plateforme à foils, une propulsion vélique et l'autonomie énergétique en mutualisant les savoir faire de laboratoires de l'UM et des partenaires. Il s'appuie notamment sur les développements autour d'engin de surface ayant 4 foils articulés. Rappelons ici que les foils présentent deux avantages majeurs : 1- ils réduisent fortement la traînée (résistance à l'avancement) puisque la coque n'est plus dans l'eau et 2- ils évitent le tangage et le roulis puisque le bateau « vole » à plat sur l'eau (jusqu'à une certaine hauteur de houle). La propulsion vélique est assurée par une aile rigide robotisée dont le développement de cette solution s'appuie sur le savoir faire du LIRMM en matière de robot à câble. L'étude des aspects énergétiques de ce projet s'appuie sur les compétences développées au sein de l'IES.

Mais contrairement aux projets précédents développés à l'UM sur les engins à foil, cet engin sera radicalement nouveau pour plusieurs raisons :

1. La partie aérienne sera composée d'une aile rigide horizontale. Ce système est inspiré des ailes de kitesurf ou de parapente. Le profil aérodynamique de la partie émergée génère donc également une portance qui soulève l'ASV-Mobula qu'il y ait du vent ; ou bien même si l'engin avance uniquement au moteur, puisqu'un vent apparent est alors généré (principe des ailerons des voitures de course). Toutefois cette aile doit avoir une certaine incidence vis-à-vis du sens du vent pour pouvoir remonter au vent. En effet, les lois de régulation par rapport à une voile verticale (sur un mat) sont différentes et plus complexes. Ceci est déjà un challenge pour les automatismes nécessaires au fonctionnement de l'aile. Mais les nombreux avantages de cette architecture surpassent les inconvénients : moins de prise au vent, moins de gîte, plus grande discrétion sur l'eau, possibilité de mettre les panneaux solaires face au ciel, possibilité de mettre les capteurs embarqués et en partie l'électronique dans le volume de l'aile (face avant plus renflée). Enfin, ce dispositif combine comme nous l'avons déjà vu, les avantages de la portance avec l'effet de surface, qui optimise les écoulements d'air sur l'intrados de l'aile.
2. Ainsi, pour optimiser le fonctionnement de la partie aérienne, les foils devront être articulés pour permettre à l'engin de se coucher légèrement sur le côté ou de se mettre en crabe pour exploiter le vent au mieux. Les foils seront donc articulés dans deux axes : axe vertical au niveau des jambes des foils qui pourront tourner de $\pm 45^\circ$ de part et d'autre de l'axe d'avancée du bateau (comme les roues avant d'une voiture, mais sur les 4 foils) et axe horizontal qui permet au foil de prendre plus ou moins d'incidence face au plan horizontal (fonctionnant comme les flaps d'ailes d'un avion au décollage ou à l'atterrissage). Les foils arrière seront en outre munis d'un moteur électrique chacun. La rotation des jambes sera donc similaire sur les 4 jambes, par contre la rotation de l'incidence des foils pourra varier individuellement pour que l'ASV-Mobula se mette dans la position optimum face au vent, selon l'angle d'incidence de l'aile (horizontal et vertical). Ce double système de rotation va nécessiter des développements technologiques importants et spécifiques par rapport aux différents projets actuels d'engins à foil développés en région.
3. Le troisième challenge de ce projet est la gestion de l'énergie. Aujourd'hui, le principal frein au développement des drones et des ASV est la capacité d'énergie embarquée. Les foils sont une première réponse mais insuffisante pour des engins devant être en relative autonomie en mer. Les panneaux solaires améliorent le bilan énergétique, d'autant plus que les foils réduisent la consommation totale d'énergie comparativement à un bateau classique. Notre objectif est que

les panneaux solaires puissent produire l'énergie nécessaire au déplacement de l'ASV-Mobula en conditions moyennes, c'est-à-dire avec une vitesse correspondant à une consommation des moteurs électrique à 40%- 50% de leur puissance. Cette vitesse restera supérieure à la vitesse de décollage de l'ASV-Mobula sur ses foils (environ 5-6 nœuds). Mais cela est encore insuffisant pour donner une autonomie maximale à l'ASV-Mobula. c'est là que le fonctionnement de l'aile intervient. Si le vent est suffisant il pourra contribuer significativement à l'avancement de l'ASV-Mobula. Soit en étant au portant et l'ASV-Mobula sera en mode vent arrière, soit en inclinant l'aile par rapport à l'incidence du vent, de façon à générer une portance dont le vecteur sera positif sur l'axe de déplacement. Sous ces conditions, l'un ou les deux moteurs pourront alors fonctionner en mode hydrogénérateur, afin de se servir de la poussée du vent pour faire tourner les hélices et ainsi recharger les batteries. Bien entendu, sous ces mêmes conditions de vent, les panneaux solaires vont également permettre de recharger directement les batteries.

Ce projet a été découpé en 4 lots afin d'en faciliter la gestion et le succès. Ce document a pour objet de faire un reporting sur les actions déjà menées dans ces différents lots. Le Lot1 concerne les aspects organisationnels, le Lot2 les aspects mécaniques, le Lot3 les aspects énergétiques et le Lot4 les aspects contrôles, commandes et optimisation. Ce document présente les avancées dans chacun de ces lots à la date de rédaction du rapport.

2 - LOT1 : management de projet, industrialisation, brevets, partenariats

Suite à la recherche d'un nouveau partenaire industriel et à la mise en disposition de M. V. Dufour, à l'initiative de ce projet, la date de lancement du projet a été décalée une première fois de ?? à ?? . De plus comme tous les projets actuellement encours, son organisation a été fortement impactée par les restrictions sanitaires dues à la COVID 19 et la date de fin a finalement été repoussée au 31/12/2021. les conditions actuelles ne facilitent toujours pas la bonne marche du projet.

2.1 Ressources humaines

Ce projet est articulé autour d'une équipe constituée de sept enseignant-chercheurs, appartenant à quatre laboratoires de l'Université de Montpellier, de collaborateurs de la société Seaproven et de personnes en employé en CDD. La liste détaillé des personnels permanents est donnée en annexe1 alors que la liste des CDD avec les contrats associés est présentée ici :

1. M. Yoann Robert a été embauché sur un poste d'ingénieur d'étude hydrodynamique du 15/09/2018 au 14/09/2019 sur le contrat ASV-Mobula et prolongé sur des financements propres du LMGC du 15/09/2019 au 29/02/2020. Le principale objet d'étude de ce contrat étaint de fiabilisé les études aerodynamique et hydrodynamaique sur le projet ASV-Mobula. Ce contrat a été réalisé en avance de phase par rapport à la date de démarage du projet.
2. M. Loïc Wamytan a effectué un stage master 2 du 02/03/2020 au 31/07/2020 sur des crédits DOTATION UM du LMGC. M. Wamytan a essentiellement travaillé sur la conception des solutions techniques autour de l'articulation des foils
3. M. Malek Boufatah a effectué un stage de master 2 du 22/03/2021 au 31/07/2021 sur les crédits du contrat ASV-Mobula. M. Boufatha a continué les développements autour du P.OC. de l'aile robotisée.
4. M. ?? Tho (LIRMM)
5. M. Gaël Mondor, a été recruté pour une durée de 15 mois sur un contrat de type Assistant Ingénieur en CDD,. Il s'agit d'un ancien étudiant de l'IUT de Nîmes, DUT, département Sciences et Génie des Matériaux. M. G. Mondor a étudié les problématiques d'encapsulation, d'étanchéification des éléments de structure des moteurs immergés, et a aussi travaillé sur le traitement de surface des pièces métalliques immergées.
6. M. G. Pellecier, Docteur de l'Université de Montpellier, Spécialiste en électronique numérique et électronique de puissance é été recruter sur un contrat de type Ingénieur d'étude sur une durée

de six mois. M. G. Pellecuer est chargé des problématiques de contrôle-commande des moteurs de propulsion, de la gestion de l'énergie photovoltaïque, et des problématiques d'IHM.

2.2 Réglementation et collect de données

L'optimisation de l'autonomie opérationnelle, énergétique et décisionnelle, des systèmes marins naviguant est un enjeu scientifique et technologique devenu pressant face aux défis que posent, entre autres, la surveillance de zones marines protégées ou réservées, le suivi de multiples paramètres environnementaux dans la zone littorale, l'évaluation de l'impact environnemental des activités humaines dans le domaine marin et notamment du transport maritime et, plus globalement, la compréhension des phénomènes en jeu dans le fonctionnement et la résilience des écosystèmes océaniques. Ainsi il devient indispensable, afin de répondre au besoin toujours croissant de données pertinentes, de permettre l'allongement des séries spatio-temporelles et donc de maintenir en mer, sur de longues durées, des systèmes de mesure fiables capables de couvrir, en totale autonomie, des zones étendues de territoire marin. De plus dans l'optique de décarboner les opérations maritimes, le développement de solution propulsive et énergétique alternatives est de plus en plus recherché dans le secteur maritime. Les Apports de Out-There Consulting au projet ASV-Mobula sont de différents types :

- Approche du cadre réglementaire concernant les drones marins,
- Le protocole "mer & espace" au cœur de la démarche scientifique opérationnelle de l'ASV-Mobula et du partenariat avec Seaproven,
- La collecte de données et les capteurs embarqués de l'ASV-Mobula,

2.2.1 Approche du cadre réglementaire concernant les drones marins

Le suivi et la revue du cadre réglementaire des drones maritimes effectué depuis le début du projet fixe essentiellement le cadre d'utilisation du Mobula par ses futurs opérateurs. Cependant, certains points de vigilance sont à noter concernant les principes opérationnels et l'architecture qui peuvent impacter/orienter les choix stratégiques de conception au stade de la R & D.

2.2.1.1 Le contexte administratif et juridique

En 2016, la loi "pour l'économie bleue" dite Loi Leroy a introduit pour la première fois en droit français la notion de drone maritime et cadre leur statut juridique et leur régime de responsabilité pour leur usage à partir d'un navire. En 2019 la loi d'orientation des mobilités – LOM – a précisé le cadre expérimental (Référence LOM : Art.135, X), la nature du texte à prendre (Arrêté) et la thématique : Expérimentation des navires autonomes, drones de surface ou sous-marins avec nécessité de fournir un dossier technique et d'analyse de risques à la Préfecture maritime de référence. Sont aujourd'hui et de part la réglementation en vigueur – et en évolution constante – considérés comme « navires autonomes » tous les engins flottants de surface ou sous-marins autonomes ou commandés à distance, dotés d'une capacité de manœuvre, et qui, à divers degrés, peuvent être utilisés sans interaction humaine. Ce « navire autonome » qui doit être soumis à l'essai, peut être commandé soit par un personnel embarqué depuis un pupitre de commande, soit à distance par un opérateur non embarqué, soit par un système programmable avec ou sans interaction humaine, soit encore par un système « intelligent » proposant à la fois l'autonomie opérationnelle et décisionnelle.

Par dérogation aux dispositions de la quatrième partie du code des transports et à titre expérimental pour une durée n'excédant pas deux ans, la navigation des bateaux, engins flottants et navires autonomes ou commandés à distance, à l'intérieur de la mer territoriale – c'est-à-dire sous juridiction maritime nationale - ainsi que sur les lacs et plans d'eau, peut être autorisée par le représentant de l'État territorialement compétent. Cette autorisation est délivrée pour une durée limitée et dans le

respect des conditions permettant d'assurer la sûreté et la sécurité des personnes et des biens ainsi que la préservation de l'environnement. La navigation des engins flottants de surface maritimes ou sous-marins, autonomes ou commandés à distance, peut être autorisée en aval du premier obstacle à la navigation maritime des navires – port, installation offshore comme les champs éoliens, parcs économiques, Aires marines protégées, etc. - , à titre expérimental, pour une durée maximale de deux ans, dans des conditions dérogeant aux règles fixées par la cinquième partie du code des transports. La navigation de ces engins flottants de surface fait l'objet d'autorisations uniques, délivrées par le représentant de l'État en mer (Préfecture maritime de référence), pour des durées limitées, et toujours dans le respect des conditions permettant d'assurer la sûreté et la sécurité des personnes et des biens ainsi que la préservation de l'environnement.

Pour accompagner le projet ASV-Mobula il a donc été nécessaire de suivre le travail effectué par différentes instances maritimes sur le cadre réglementaire notamment à travers :

- Le sous-groupe synergie « Drones Maritimes » du Cluster Maritime Français mis en place depuis 2015. Cette instance a permis la préparation d'un guide de bonnes pratiques en attendant les réglementations officielles édictées par la Direction des Affaires Maritimes en complément de son règlement sur la sécurité des navires et en complément de l'article 135 de la loi d'Orientation des mobilités.
- Les travaux de La Direction des Affaires Maritimes qui doit produire un rapport pour préparer une loi d'habilitation sur les drones.
- Les travaux du Comité de la sécurité maritime (MSC) de l'OMI (Organisation maritime internationale) qui a entamé des travaux visant à déterminer la manière dont l'exploitation sûre, sans danger et écologiquement rationnelle des drones et navires de surface autonomes depuis 2018 et propose régulièrement sur le sujet des amendements. Pour rappel : sont jusqu'à ce jour exclus du champ d'application de ce guide et des différentes approches réglementaires les engins de plage et les engins non manœuvrants, tels les pontons fixes ou les bouées dérivantes en usage pour la recherche scientifique, mais pas les drones de surface même de faible dimension comme le ASV-Mobula.

2.2.1.2 ASV-Mobula dans le contexte des drones maritimes

En prenant en considération les éléments réglementaires qui se mettent en place, ASV-Mobula répond donc aux définitions suivantes :

- « drone maritime », c'est à dire « engin flottant de surface ou sous-marin, doté d'une capacité de manœuvre en surface et qui, à divers degrés, peut être utilisé sans interaction humaine, que l'engin ait ou non la qualité de navire au sens de la réglementation ».
- « engin autonome », c'est-à-dire un drone maritime, sans personne embarquée, sans passager, ni équipage.

Son périmètre opérationnel sera donc encadré comme suit :

- Avoir la capacité d'être commandé par une ou plusieurs des méthodes suivantes :
 1. soit à distance par une personne non embarquée à son bord
 2. soit par un système programmable avec ou sans interaction humaine
- Sera considéré comme opérateur la personne qui, à distance, sera responsable du drone pendant un cycle d'opérations
- En ce qui concerne le système programmable il s'agira d'un système (mécanique, électrique, électronique, magnétique, hydraulique, etc.) basé sur un ou plusieurs dispositifs dont on peut régler à l'avance la mise en œuvre pour des fonctions de commande, de contrôle, de protection, d'enregistrement, de surveillance ou de veille...

- Pour ce qui est de la veille, elle pourra consister à maintenir une vigilance constante visuelle et auditive notamment pour évaluer pleinement la situation et les risques d'abordage, d'échouement et les autres dangers pour la navigation.
- Au-delà des règles de veille, le niveau d'autonomie de navigation devra définir, dans une échelle de référence non encore définie, les fonctions de navigation (planification des routes, veille, conduite) qui peuvent être déléguées au système programmable du drone.

Pour ce qui est du cadre technique et des recommandations afférentes il faut savoir qu'il n'y a à ce jour pas de réglementation et aucun travail réglementaire en cours précisant ce qui est exigé pour un « drone maritime de moins de 24 m » qui est aujourd'hui la jauge de référence, ainsi :

- L'immatriculation d'un engin autonome n'est pas obligatoire (demande possible auprès de la DAM)
- Cependant un marquage d'identification devra être indiqué sur le drone (les lettres « DRN », éventuellement suivies du nom et du port d'immatriculation du navire à partir duquel il est commandé). Il faut donc prévoir un « châssis » permettant aux opérateurs de se mettre éventuellement en conformité avec cette recommandation.
- Une déclaration d'opération est recommandée (pour l'instant pas obligatoire mais...)
- Les drones maritimes doivent disposer d'un certificat du fabricant précisant la conformité du drone aux normes et standards appliqués. Les spécifications sont donc à détailler lors du passage à la phase industrielle ou opérationnelle.

Enfin pour pouvoir naviguer dans les eaux territoriales ou la Zone Économique Exclusive françaises, le drone maritime doit :

- soit être immatriculé en accord avec les autorités publiques et disposer des titres de navigation valides en conformité avec son exploitation,
- soit être commandé ou contrôlé à partir d'un navire battant pavillon français et la veille du drone en surface doit le cas échéant être assurée de jour comme de nuit à partir du navire,
- soit, avoir suivi une procédure d'agrément validée par les autorités françaises.

À ce titre, le drone peut faire l'objet d'une autorisation de navigation pour une période et dans une zone donnée, délivrée par les autorités maritimes au titre d'un évènement nautique, d'une mission particulière ou d'une zone d'essai de drone maritime par exemple :

- L'opérateur a l'obligation de prendre toutes mesures nécessaires pour s'assurer de la maîtrise du drone pendant chaque cycle d'opérations
- Le commandement et le contrôle du drone peuvent s'exercer à distance, depuis une station de contrôle, à terre ou embarquée et mobile, conçue pour permettre à l'opérateur de reprendre la main.
- l'AIS n'est pas obligatoire pour les engins autonomes non immatriculés
- Le drone maritime doit être équipé d'un moyen de communication ou de signalisation permettant de signaler sa position et ses avaries à la personne assurant son contrôle.
- Dans le cas d'une commande à distance, le drone maritime doit être équipé d'un système de communication descendante (de l'opérateur vers le drone) disposant d'une qualité (bande passante, temps de latence et taux d'erreur) suffisante.
- Dans les phases d'essais et de tests l'utilisation d'un drone en mer doit faire l'objet d'un avis aux navigateurs.
- En dehors des Zones d'Essais Autorisés, toute sortie d'essais en mer d'un drone est soumise à autorisation des autorités publiques compétentes.

Points de vigilance en matière de sécurité maritime Les préfetures maritimes regardent avec grand intérêt et vigilance le développement des drones de surface notamment pour ce qu'elles considèrent être des facteurs de risques :

- l'acte de terrorisme, d'espionnage
- Le détournement, ou la prise de contrôle intentionnelle par un tiers à des fins de vol du système et/ou des données - risque cyber
- La perte de contrôle, la diminution ou la perte complète de manœuvrabilité, ou encore le non-respect des règles de navigation
- Le risque de collision avec des embarcations légères ou des nageurs
- Le risque de pollution (chimique, mécanique, électromagnétique ou sonore) de l'environnement et/ou de système(s) tiers
- Le risque de perte du drone par voie d'eau et/ou échouement (naufnage).

Annexe au cadre administratif et juridique : le travail de la Direction des Affaires Maritimes Dans le cadre de la préparation du projet d'ordonnance « navires autonomes », une première séquence d'échanges a été organisée par la Direction des affaires maritimes en vue de recueillir les attentes et réflexions des industriels de ce secteur en pleine croissance ainsi que ceux des partenaires sociaux représentatifs au commerce.

Pour rappel, ce projet d'ordonnance a pour objectif de modifier le code des transports afin de lever les obstacles à la navigation d'engins flottants autonomes ou commandés à distance, tout en préservant la sécurité de la navigation et la protection de l'environnement. En l'état actuel des innovations technologiques et au regard de l'accent mis sur le développement de petits engins type ASV-Mobula, il a été introduit une distinction entre navires autonomes et drones maritimes. Cette distinction permettrait d'une part d'exclure de l'application du code des transports les « drones maritimes » et de les soumettre à une réglementation ad hoc, et, d'autre part, d'instituer un régime expérimental pour l'exploitation des navires autonomes.

Aussi, la seconde – et dernière en date - séquence d'échanges du 11 mai 2021, a précisé les contours du projet et ouvert une discussion sur les critères de définition, d'identification et d'autorisation des drones maritimes ainsi que sur le régime le plus à même d'accompagner les nombreux projets qui se développent et portent la croissance d'une industrie à caractère stratégique.

2.2.1.3 Distinction entre navires autonomes et drones maritimes :

L'article L.5000-2 du code des transports donne une définition du navire qui intègre le cas des navires autonomes. Néanmoins, il est proposé d'exclure de l'application de la 5ème partie du code des transports, sauf disposition contraire, les « drones maritimes » et de renvoyer au règlement le soin de préciser les règles applicables à ces engins. Un décret d'application viendrait poser les bases d'un corpus réglementaire applicable aux drones maritimes, prévoyant leur définition, les modalités de leur identification et soumettre dans certains cas leur navigation à une autorisation préalable afin de maintenir un niveau satisfaisant de sécurité de la navigation.

Les prémisses de cette distinction ont été introduites par l'arrêté du 20 mai 2020, relatif aux modalités d'expérimentation de la navigation des engins flottants maritimes autonomes ou commandés à distance, pris en application de l'article 135 de la loi LOM et qui met en place un double régime d'autorisation des essais. Il prévoit que les engins ne dépassant pas certains critères de taille, de puissance, de vitesse et d'usage, sont soumis à un régime de déclaration préalable et les autres à un régime d'autorisation préalable.

Pour l'heure les engins ne nécessitant qu'une déclaration préalable dans le cadre de l'arrêté du 20 mai 2020 sur les expérimentations sont ceux remplissant les critères cumulatifs suivants :

- Les engins dont la longueur multipliée par la largeur (dimensions hors tout), exprimée en mètres, ne dépasse pas 10
- Les engins dont le poids à vide en tonnes multiplié par la puissance en kW ne dépasse pas 10
- Les engins dont la vitesse ne peut dépasser 10 nœuds
- Les engins sans personnel et sans cargaison à bord

Ce sont ces engins qui entreraient dans la catégorie « drones maritimes » et dont la réglementation serait prévue par voie réglementaire.

Hormis les critères de distinction, restent en suspens : les éventuels besoins en formation, la pertinence d'introduire une distinction entre usage professionnel et récréatif (des critères seraient alors à définir là aussi) ou encore la nécessité de préciser le régime de responsabilité.

2.2.1.4 Le protocole « mer & espace » au cœur de la démarche scientifique opérationnelle de l'ASV-Mobula

Le développement des drones marins connaît aujourd'hui une accélération remarquable grâce, notamment, à l'évolution des nombreuses technologies permettant désormais, et en temps réel, d'analyser, de numériser et de contextualiser l'environnement proche ou lointain d'un drone de surface, comme de l'interfacer avec des systèmes de pilotage et de contrôle à distance.

Approche du lien potentiel avec le spatial La viabilité opérationnelle du drone de surface tel que l'ASV-Mobula impose ainsi une extrême fiabilité des systèmes embarqués que seuls un environnement multi-capteurs ultra précis, des capacités d'analyse et de calcul optimum et des possibilités de communication sans faille peuvent garantir au niveau de sécurité requis. Et dans ce contexte où la localisation est un enjeu technologique primordial, le satellite peut être considéré comme un allié du drone marin, si ce n'est son corollaire indispensable. Mais là ne s'arrêtent pas ses avantages et les services fournis par les satellites sont aussi, notamment, essentiels au développement de nouvelles activités liées à la surveillance de l'écosystème marin ou du domaine maritime au sens économique ou géostratégique. Et dans ce domaine encore, la mise en œuvre de protocoles scientifiques et technologiques innovants démontre que l'utilisation du satellite comme relais de communication au sens large se pose comme un préalable, voire un incontournable, que ce soit en termes de réponses opérationnelles proprement dites qu'en termes de services aval.

Ainsi, ces services, globalement numériques, reposant la plupart du temps sur la collecte, la compilation, la hiérarchisation, la mutualisation et l'utilisation d'une multitude de données électroniques, permettent aujourd'hui, au-delà d'une autonomisation plus ou moins poussée des principes de navigation, la conception et l'exploitation de systèmes embarqués autonomes d'analyse, de surveillance, d'assistance, de défense ou de protection, constituant alors le cœur de la mission du drone marin. La question n'est ainsi plus uniquement de savoir comment rendre possible l'autonomisation des drones marins mais bien de définir quelle est la meilleure combinaison de technologies et de méthodes qui peut offrir le niveau de performance, de sécurité et de fiabilité recherché dans un contexte de mission pré-défini. Et dans ce domaine, la coopération technologique « Mer & Espace » est une des clés du succès, le satellite permettant non seulement de fournir des coordonnées de positionnement d'une extrême précision (aujourd'hui de l'ordre du centimétrique) mais garantissant une maîtrise des systèmes de communication, pierre angulaire de la transmission des données montantes (analyse et caractérisation scientifique de l'environnement marin ou sous-marin, surveillance environnementale ou stratégique d'aires marines ou de zones économiques, etc.) et descendantes (contrôle de commandes à distance, pilotage télé opéré, implémentation des protocoles de mission initiaux, etc.).

Le temps réel est ainsi l'autre maître-mot de la relation « Mer & Espace » développée au cœur d'une mission « drone marin » puisque ce principe collaboratif est à même de garantir à chaque instant, pour l'opérateur, le positionnement et le déplacement optimum de son drone de surface, la caractérisation

précise de ses protocoles opérationnels et l'assurance de fournir à ses utilisateurs finaux des données caractérisées et géolocalisées qui peuvent être rapatriées en temps réel pour analyse, interprétation et éventuellement prise de décision suivie d'action dans la zone monitorée.

En retour, la collaboration entre les drones de surface et les opérateurs de satellites scientifiques comme le CNES (Centre national d'études spatiales) ou l'ESA (Agence spatiale européenne) offre un champ collaboratif particulièrement intéressant pour ces dernières, leur permettant notamment de calibrer les instruments embarqués à bord des satellites et de valider in situ les mesures effectuées par ces derniers. Cette capacité de calibration/validation des images et données altimétriques diverses caractérisant les masses d'eau et aires marines sur le plan physique et biologique est particulièrement intéressant, combiné à la capacité opérationnelle des drones de surface, pour blanchir les zones marines peu monitorées par les autres moyens (navires océanographiques, bouée dérivantes, gliders et autres profileurs) dont dispose l'océanographie moderne. Les données scientifiques recueillies – dont le spectre est aujourd'hui très vaste de part la miniaturisation et les performances des capteurs physiques, chimiques, biologiques, etc. (cf partie sur les capteurs) – pourront venir implémenter en retour le prisme de données génériques recueillies par les satellites.

Les orientations technologiques autour du concept opérationnel projeté de l'ASV-Mobula se doivent donc de prendre en considération le concept de mission maritime autonome, notamment à but scientifique ou environnemental. Les équipements et les expertises permettant d'établir des communications – notamment satellites - de différents calibres et pour différentes applications opérationnelles, techniques et scientifiques, doivent répondre aux besoins des futurs opérateurs de l'ASV-Mobula dont les objectifs se déploieront parfois loin des côtes et donc hors des zones de communication traditionnelle. c'est dans ce sens que des contacts ont été pris très en amont avec CLS/KINEIS (filiale du CNES) enfin de tester le moment venu les nouveaux protocoles de communication avec tous les satellites Kineis-Argos permettant de fournir une connectivité et une localisation par satellite aux appareils IoT, l'utilisation des signaux et protocoles ARGOS RF garantissant une très faible consommation d'énergie lors de l'envoi de données partout dans le monde. Car le pari opérationnel de l'ASV-Mobula s'inscrit bien dans cette nouvelle capacité d'investigation du milieu marin ouvrant sur des opportunités d'observation uniques puisque s'inscrivant dans une échelle temporelle non limitative résultant des capacités sans cesse améliorées du drone de surface en matière d'autonomie. Et par cette composante « Mer & Espace », c'est donc toute une nouvelle ère d'investigation et de monitoring du milieu marin qui s'ouvre grâce aux drones de surface qui, en agréant de multiples technologies d'analyse et de communication, notamment spatiales, vont permettre la construction écosystémique d'un big data marin, seul garant de notre meilleure capacité à appréhender les nombreux enjeux planétaires auxquels nous devons faire face.

2.2.1.5 L'expérience des missions Sphyrna Odyssée de Seaproven, partenaire du projet ASV-Mobula : Référentiel partenarial

Le programme Sphyrna Odyssée de Seaproven s'inscrit dans cette nouvelle capacité d'investigation du milieu marin ouvrant sur des opportunités d'observation uniques puisque s'inscrivant dans des échelles temporelle et spatiale non contraintes résultant des capacités sans cesse améliorées des drones de surface en matière d'autonomie navigationnelle et énergétique. La résultante : une capacité quasi illimitée à multiplier les séries spatio-temporelles ouvrant toute une nouvelle ère d'investigation et de monitoring du milieu marin. Grâce aux drones de surface, capables d'agréer de multiples technologies d'analyse et de communication, notamment spatiales, la construction écosystémique d'un big data marin, seul garant de notre meilleure capacité à appréhender les nombreux enjeux planétaires auxquels nous devons faire face, est aujourd'hui envisageable. Au-delà des aspects scientifiques de collecte de données marines proprement dits, offrant par ailleurs un bon référentiel pour définir le cadre du principe opérationnel de ASV-Mobula, les missions Sphyrna Odyssée de Seaproven ont démontré que

toute stratégie actuelle de développement des drones marins impose un contexte où la géo-localisation et le géo-positionnement sont des enjeux technologiques primordiaux, tout comme la communication cybersécurisée. Le satellite est alors le meilleur ami du drone marin. Le travail et l'approche de Seaproven ont montré que, dans de nombreux domaines, la mise en œuvre de protocoles scientifiques et technologiques innovants utilisant le satellite comme relais de communication au sens large constituait une brique technologique offrant un fort avantage concurrentiel à condition de correctement la prototyper avant tout déploiement opérationnel. En retour, de nombreux services aujourd'hui fournis par les satellites, notamment dans les domaines de la surveillance de l'écosystème marin ou du domaine maritime au sens environnemental, économique ou géostratégique, demande un retour d'expérience issu du terrain. Cette "ground validation" est essentielle aux opérateurs de satellites pour calibrer leurs instruments et valider la pertinence de leurs mesures et elle offre aux opérateurs de drones marins un vaste champ opérationnel collaboratif avec le milieu spatial.

Le partenariat développé entre Seaproven et le CNES (Centre national d'études spatiales) et l'ESA (Agence spatiale européenne) repose en partie sur cette capacité des drones de fournir de la donnée in situ caractérisée et étalonnée pour les instruments embarqués à bord des satellites. Plus largement cette capacité de calibration/validation des images et données altimétriques diverses caractérisant les masses d'eau et aires marines sur le plan physique et biologique est particulièrement intéressante, combinée à la capacité opérationnelle des drones de surface, pour blanchir les zones marines peu monitorées par les autres moyens (navires océanographiques, bouée dérivantes, gliders et autres profileurs) dont dispose l'océanographie moderne. Les nouveaux jeux de données scientifiques recueillies durant les missions Sphyrna Odyssée 2019 et 2020 – notamment bio-acoustiques – ont démontré leur intérêt pour les océanographes satellitaires puisqu'ils sont de nature à venir implémenter en retour le prisme de données génériques recueillies par les satellites de l'ESA et du CNES. Partenaire scientifique de Seaproven, l'ESA fournit plus particulièrement des jeux de données satellites (images, données altimétriques diverses) caractérisant, sur le plan physique et biologique, les masses d'eau traversées par la mission. Le retour d'expérience de ce protocole partenarial pourra bénéficier au programme ASV-Mobula et même être étendu à ce dernier au moment de phase de démonstration opérationnelle. Un autre niveau de collaboration entre Seaproven et l'équipe projet de l'ASV-Mobula a porté sur le prototypage de la capacité opérationnelle autonome d'un drone de surface de type ALSV (Autonomous Laboratory Surface Vehicle) tel que le Sphyrna de Seaproven. Véritable plateforme navigante instrumentée, le Sphyrna fait, grâce à ses partenaires techniques, la démonstration de sa capacité à fournir à tout type d'utilisateur des services, globalement numériques et reposant la plupart du temps sur la collecte, la compilation, la hiérarchisation, la mutualisation et l'utilisation d'une multitude de données électroniques. Au cours des missions Sphyrna Odyssée 2019 et 2020, les multiples capteurs environnementaux équipant les drones ont fourni des jeux de données qui devaient être renvoyées vers des bases de données à terre. Partenaire technique des missions Sphyrna Odyssée, le CNES, a fourni l'expertise globale en terme de géolocalisation et de géo positionnement tant pour les systèmes de navigation que pour la caractérisation des données scientifiques collectées (analyse et caractérisation scientifique de l'environnement marin ou sous-marin, surveillance environnementale ou stratégique d'aires marines ou de zones économiques, etc.). Cette voie "montante" utilisait entre autres la plateforme CESARS du CNES qui a testé avec le programme Sphyrna Odyssée l'usage de nouvelles technologies de télécommunication par satellite via la constellation Iridium Next. Le renvoi de données scientifique à terre utilisait aussi le terminal PLANET de la filiale du CNES ATMOSPHERE qui a permis de tester une solution de communication par satellite (Satcom) et de communication en mer au moyen de la constellation de satellites Iridium ou de réseaux cellulaires pour la transmission de données scientifiques en temps réel. Là encore, le retour d'expérience doit bénéficier au projet ASV-Mobula lors de son passage à la phase opérationnelle expérimentale, le même type de partenariat pouvant lui être étendu. A noter que CLS/Kinéis est aussi partenaire des missions Sphyrna Odyssée ce qui lui permet d'utiliser le drone comme collecteur de données permettant de faire le lien entre des réseaux de capteurs sous-marins et

des opérateurs terrestres.

2.2.1.6 La collecte de données et les capteurs embarqués de l'ASV-Mobula

La mesure de paramètres environnementaux en milieux marin, lagunaire, portuaire est d'un intérêt majeur pour les sciences marines, les gestionnaires de la bande côtière ou d'aires marines protégées, ou encore des professionnels de différentes filières de l'économie maritime qui souhaitent mettre en place des outils innovants afin d'améliorer leur compétences ou de dynamiser leurs services et leurs activités. La mesure de paramètres physicochimiques et biologiques dans le milieu marin est ainsi d'un intérêt majeur pour le monitoring environnemental de zones marines et littorales comme pour la détection, en temps réel, de polluants ainsi que pour la localisation des zones de rejet. Ces informations contribuent notamment à la mise en place d'actions préventives de préservation de la qualité des eaux et de sécurisation d'activités importantes en région telles que le tourisme ou l'ostréiculture. La connaissance des caractéristiques du milieu marin par l'acquisition de données environnementales, s'avère encore particulièrement importante pour affiner les modèles analytiques actuels de la dynamique marine, notamment afin d'anticiper les effets du réchauffement climatique et de suivre leur impact sur les écosystèmes marins et les zones côtières. Et malgré la multiplication des techniques océanographiques, le milieu marin demeure, relativement à sa dimension et à sa dynamique, peu monitoré notamment en temps réel qui est le paramètre le plus important aujourd'hui dans un contexte de services et de réponses rapides à des problématiques diverses. Afin donc de développer ces usages, et notamment d'avoir la capacité de les déployer à grande échelle et de garantir l'allongement des séries spatio-temporelles de mesure, il est nécessaire de développer des plateformes mobiles autonomes en fonctionnement comme en énergie capable d'accueillir des systèmes et des capteurs embarqués miniaturisés et communicants. c'est le pari opérationnel de l'ASV-Mobula.

L'ASV-Mobula est donc conçu pour devenir un patrouilleur inlassable et infatigable du milieu marin. Echanges océan-atmosphère permettant de mieux comprendre la régulation du climat planétaire, caractérisation des engrais et pesticides qui se déversent dans les eaux côtières via les fleuves et les estuaires, monitoring des polluants tels que les hydrocarbures, les produits chimiques en tous genres et les résidus pharmaceutiques, suivi des déchets plastiques, alertes bactériologiques, le rôle du drone, notamment dans le secteur de la surveillance littorale, n'est plus à démontrer pour répondre à des besoins croissants. Et au-delà des besoins scientifiques, ce sont aussi des enjeux économiques potentiellement impactés par toutes ces problématiques environnementales qui auxquelles l'ASV-Mobula doit répondre. Dans un contexte où la qualité des milieux conditionne le maintien de l'ensemble des activités maritimes, les atteintes croissantes à l'environnement marin pouvant impacter durablement les économies des territoires côtiers réclament l'intervention des drones.

Mais l'ASV-Mobula peut aussi servir à la surveillance maritime dans le cadre de la préservation des milieux naturels marins sous juridiction, du développement des parcs éoliens offshores, du maintien du bon état des eaux marines et lagunaires pour les filières halieutiques ou encore du monitoring de l'érosion du trait de côte. Les analyses biologiques, chimiques et physiques de l'eau de mer sont majoritairement réalisées aujourd'hui à partir de prélèvements ensuite traités en laboratoire. Cela impose des sorties en mer ou des campagnes de prélèvements régulières, souvent onéreuses, avec des possibilités de mesures qui restent restreintes par le périmètre et la durée de l'opération. Le développement de drones transporteurs de capteurs de mesures ouvre la voie à des systèmes de mesures in situ automatisés et mobiles offrant une capacité de redondance nouvelle et capitale d'autant plus quand ceux-ci, comme l'ASV-Mobula, évoluent vers des systèmes autonomes en énergie et en fonctionnement opérationnel.

Le couple capteurs innovants et drone autonome constitue donc le ticket gagnant pour ouvrir une nouvelle voie dans le domaine de la donnée marine au sens large. La généralisation des systèmes comprenant le vecteur navigant autonome tel le l'ASV-Mobula, les capteurs associés et les systèmes de communication adéquats est donc aujourd'hui indispensable au développement d'activités nécessitant

une mesure à haute fréquence, possible à grande échelle et en temps réel.

2.3 Brevet

Il n'existe pas aujourd'hui de demande de dépôt de brevet mais nous avons commencé la rédaction d'un article scientifique autour de la régulation d'un engin à 4 foils. L'utilisation d'une aile rigide piloté par des câbles pour assurer la propulsion vélique de l'engin peut être l'objet d'une tel demande et à minima du dépôt d'une enveloppe solo.

2.4 Industrialisation et partenariat

Les échanges autour de ce projet avec la société SEA Proven se font via M. A. Fuchs. Au regard de l'avancement des prototypes la phase d'industrialisation n'a pas encore été abordée.

3 - LOT2 : Mécanique et simulations

L'objectif principal de ce lot est de réaliser la simulation numérique du déplacement de l'ASV-Mobula en prenant en compte la propulsion électrique par des hélices, la poussée des foils limitant la trainée de l'engin et la traction de l'aile rigide. Le second objectif est de réaliser les conceptions mécaniques des systèmes et la réalisation des prototypes à savoir un engin muni de quatre foils régulés et un démonstrateur de l'aile robotisé .

Les simulations hydrodynamiques et aérodynamique ont été menées d'une part par M. Y. Robert dans le cadre de son contrat en utilisant un le code "Fine/Marine" de chez Numéca et d'autre part en utilisant le simulateurs développé en interne par messieurs L. lapierre et S. Dumont. Les aspects conception des systèmes on été abordé lors des deux stages de fin d'étude de messieurs L. Wamittan et M. Boufatah.



Fig. 3.1 – Exemple d'une planche munie d'un hydrofoil et tracté par une aile (*kite*). Crédits <https://www.radicalsurfex.com/foto-foil-takoon-zeta/>.

3.1 Étude aérodynamique

une première étude à était faite pour déterminer dans quelles conditions (orientation, vitesse,...) le vent permet de propulser l'ASV-Mobula. En effet, la ou les positions relatives de l'aile rigide par rapport à l'axe du vent est une entrée important de la fonction d'optimisation qui permet de gérer les

stratégies en fonction des conditions et des objectifs. Une deuxième étude paramétrique a été faite sur les foils.

3.1.1 Étude préliminaire sur le profil de l'aile

Il est prévu que l'ASV-Mobula (*autonomous surface vehicle*) ait une propulsion vélique afin de pouvoir se déplacer en cas de faible niveau d'énergie électrique à bord ou pour diminuer la consommation énergétique des moteurs en les assistant par un autre système propulsif et en soulageant l'engin. L'aile permettant la propulsion s'inspire des ailes de kitesurf (cf. Fig. 3.1), mais elle sera toutefois rigide, pour des raisons pratiques et le choix de l'équiper de panneaux solaires. Similairement à ce qui apparaît sur la Fig. 3.2, les jambes de chaque hydrofoil servent de plan anti-dérive et permettront à l'ASV-Mobula d'avancer sur l'eau comme pour les bateaux à voile. Cette idée d'utiliser un plan de voile rigide articulé a été également utilisée dans le projet Vestas Sailrocket 2. Cependant dans ce projet l'aile n'est pas robotisée.

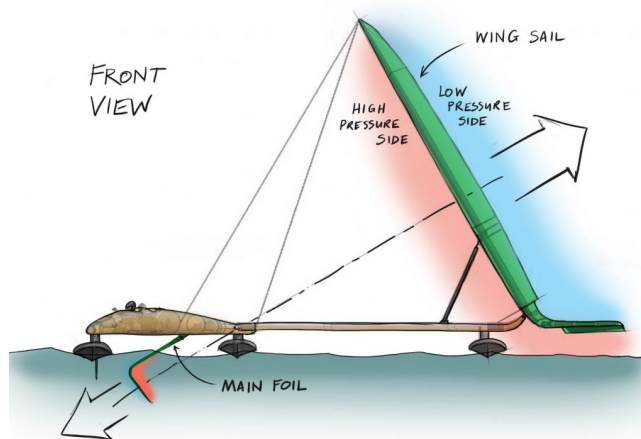


Fig. 3.2 – Principe de fonctionnement du bateau Vesta SailRocket. Crédits N. Cailloux - <https://www.windsurfing33.com/forum/viewtopic.php?f=42&t=120625/>.

La première étape est donc le choix d'un profil aérodynamique pour l'aile. Celui-ci doit permettre à l'aile de générer une portance suffisante pour que l'ASV-Mobula puisse se déplacer par ce seul moyen ou bien pour assister les moteurs. Cette étude vise à préselectionner un ensemble de profils potentiellement intéressants. Ensuite, leurs coefficients aérodynamiques sont calculés à l'aide du programme XFLR5 [1], dont le cœur est le code XFOIL [2]. Finalement, un choix est fait parmi la sélection en fonction de plusieurs critères.

3.1.1.1 Préselection de profils

N'ayant que peu de références pour établir une liste de profils potentiels, nous nous sommes tournés vers la liste proposée par Daniel Gagnon sur sa page Internet¹. Nous avons également ajouté d'autres profils trouvés sur <http://airfoiltools.com>. La liste complète est donnée dans le Tab. 3.1.

3.1.1.2 Résultats

Pour chaque profil, les coefficients aérodynamiques c_d , c_l et c_m ont été calculés à l'aide de XFLR5, pour un intervalle en nombre de Reynolds allant de 10^5 à $5 \cdot 10^6$ et pour un intervalle en angle d'attaque

1. http://members.tripod.com/daniel_gagnon0/id19.htm

Profils préselectionnés				
Clark K	Clark X	Clark Y	Clark YH	Clark Y modifié
Dominator II	Eliminator	Flexi Blade 4.9	Göttingen 398	Göttingen 623
Göttingen 693	Göttingen 796	Krypton S	MH78	MH92
MH93	NACA0018 modifié	NACA4415	NACA4418	PW98A
PW99A lissé	PW100a	PW100b	PW100c	PW104
Quadri C2	Satisfactor Ia	Satisfactor IV KS	Skytiger	Speedfoil
Sputnik 1-2	Sputnik 3	Sputnik 4	Titanium	

Tab. 3.1 – Liste des profils préselectionnés pour le dimensionnement de l'aile

(AoA) allant de -12° à 12° par pas de $0,1^\circ$. Les efforts de traînée, de portance et de moment de tangage correspondants sont calculés à l'aide des formules suivantes :

$$D = \frac{1}{2} \rho U^2 A c_d , \quad (3.1)$$

$$L = \frac{1}{2} \rho U^2 A c_l , \quad (3.2)$$

$$M = \frac{1}{2} \rho U^2 A c c_m , \quad (3.3)$$

où ρ est la masse volumique de l'air prise à $1,204 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, U est la vitesse du fluide en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, c est la corde du profil, A est l'aire formée par la projection de l'aile sur un plan horizontal à angle d'attaque nul, et où c_m et M sont exprimés au point situé au quart avant de la corde.

La Fig. B.1 montre l'évolution de ces trois efforts pour une gamme de vitesse de 1 kn à 25 kn et pour $AoA = 0^\circ$. En particulier, la Fig. B.1b montre la portance. Pour cet angle d'attaque nul, cinq comportements de profile apparaissent à mesure que la vitesse augmente (en noir, rouge, vert, bleu et cyan).

Les profils étudiés ont donc été séparé en cinq familles, numérotées de 1 à 5, par ordre de décroissance de la portance à un angle fixé de $\alpha = 0^\circ$, c'est-à-dire la première famille contient les profils avec la plus grande portance et la cinquième ceux avec une portance négative. Cette dernière famille a tout simplement été rejetée car elle n'est pas souhaitable pour les applications envisagées. La décomposition en familles est donnée dans le Tab. 3.2.

Famille 1	Famille 2	Famille 3	Famille 4	Famille 5
Clark Y modifié	Clark K	Clark YH	MH78	Krypton S
Dominator II	Clark X	Flexi Blade 4.9	MH92	Speedfoil
Eliminator	Clark Y	PW99A lissé	MH93	
Göttingen 398	Göttingen 623	PW100a	NACA0018 modifié	
NACA4415	Göttingen 693	PW100b	Skytiger	
NACA4418	Göttingen 796	PW100c	Sputnik 3	
PW98A		PW104	Sputnik 4	
Satisfactor Ia		Quadri C2		
		Satisfactor IV KS		
		Sputnik 1-2		
		Titanium		

Tab. 3.2 – Classement des profils en quatre familles suivant l'évolution de la portance en fonction de la vitesse pour un angle d'attaque nul et sélection d'un profil représentatif de chaque famille (en gras).

Le choix de faire un tri des profils par rapport à leur comportement à angle d'attaque nul vient du souhait de limiter la portance dans cette configuration sans pour autant la rendre négative. En effet, en cas de forts vents, il est souhaitable que l'ASV-Mobula puisse se mettre dans une position de sécurité et ne soit pas soulevé de la surface de l'eau. La famille 4 pourrait alors paraître alors toute indiquée. Cependant, les autres familles peuvent aussi convenir si la position de sécurité se fait avec un angle d'attaque légèrement négatif. Par ailleurs, il faut pouvoir générer une portance suffisante et sachant qu'il est assez intuitif de penser que les profils ne générant que peu de portance à $AoA = 0^\circ$ seront probablement ceux qui en génèrent le moins à $AoA = 10^\circ$, par exemple Tab .3.3.

Afin de réduire les simulations de l'étude sur de l'influence de l'angle d'incidence sur les efforts aérodynamique, un élément de chaque famille a été arbitrairement sélectionné pour permettre de mieux comparer les 4 familles dans beaucoup de configurations. Les quatre profils retenus sont le NACA 4418, le Göttingen 693 (GOE 693), le FlexiBlade 4.9 et le Sputnik 4, tous indiqués en gras dans le Tab. 3.2 et tracés sur la Fig. 3.3.

Les Fig. B.2 à B.5 donnent l'évolution des efforts en fonction de la vitesse pour ces quatre profils et pour des angles d'attaque de -5° à 10° par pas de $2,5^\circ$.

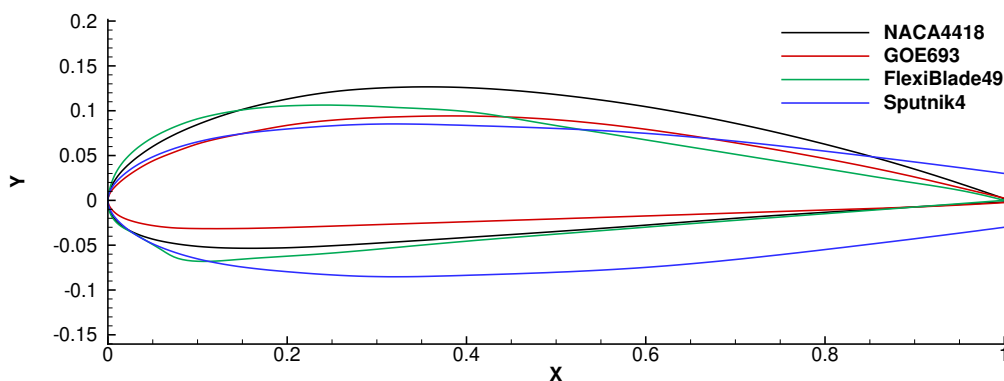


Fig. 3.3 – Coordonnées des quatre profils sélectionnés

Sur la Fig. 3.3, nous pouvons relever quelques différences entre les profils. Le NACA 4418, le Göttingen 693 et le FlexiBlade 4.9 sont asymétriques, contrairement au Sputnik 4 qui est symétrique. Ce dernier est celui qui offre la surface la plus importante (aire entre l'extrados et l'intrados), suivi par le NACA 4418, puis le Göttingen 693 et le FlexiBlade 4.9. Ce détail qui peut avoir de l'importance quand le dimensionnement de l'aile prendra en compte le fait qu'elle servira de réserve de flottabilité en cas de retournement de l'ASV-Mobula et que sa surface doit aussi permettre d'y disposer des panneaux photovoltaïques.

Le Tab. 3.3 donne les valeurs de portance obtenues à un angle d'attaque $AoA = 10^\circ$ pour les quatre profils et pour des vitesses de 5 kn à 40 kn. Tout d'abord, nous pouvons noter que le classement en familles effectué précédemment pour $AoA = 0^\circ$ se retrouve pour $AoA = 10^\circ$. Ainsi, le profil GOE 693 est environ 6 à 10 % moins portant que le NACA 4418, pris comme référence, sur l'intervalle de vitesse étudié. Le FlexiBlade 4.9 l'est aussi d'environ 8 à 11 %. Finalement, le Sputnik 4 est le moins portant des quatre, d'environ 17 à 18 %.

3.1.1.3 Conclusion

Les simulations effectuées sur XFLR5 pour les 34 profils préselectionnés ont produit une quantité importante de résultats. Nous avons pu discriminer les profils à partir de l'ensemble des courbes donnant la portance, qu'ils génèrent pour un angle d'attaque nul, en fonction de la vitesse. Cinq familles de profils ont alors été déterminées. La famille N°5 présentant des portances négatives dans cette configuration elle a été écartée. Pour les quatre autres familles un représentant a été choisi. Les

Vitesse U (kn)	NACA 4418	Göttingen 693	FlexiBlade 4.9	Sputnik 4
Portance L (N)				
5	17,2	15,5	15,2	13,9
10	68,3	63,9	61,9	56,9
15	155,9	144,8	142,0	129,1
20	280,6	258,9	255,7	230,4
25	441,2	408,1	403,1	361,1
30	636,6	592,1	583,4	521,1
35	868,0	811,5	797,4	710,5
40	1136,1	1065,9	1045,2	929,2
Écart de portance (%)				
5	Réf.	-9,55	-11,37	-18,72
10	-	-6,50	-9,42	-16,74
15	-	-7,14	-8,90	-17,23
20	-	-7,73	-8,89	-17,88
25	-	-7,50	-8,64	-18,17
30	-	-7,00	-8,37	-18,15
35	-	-6,52	-8,13	-18,15
40	-	-6,18	-8,00	-18,21

Tab. 3.3 – Comparaison des portances obtenues à un angle d'attaque $AoA = 10^\circ$ pour les profils NACA 4418, Göttingen 693, FlexiBlade 4.9 et Sputnik 4, pour des vitesses de 5 kn à 40 kn

quatre profils retenus pour la suite du dimensionnement sont le **NACA 4418**, le **Göttingen 693**, le **FlexiBlade 4.9** et le **Sputnik 4**.

Tous les chiffres présentés ici ne servent qu'à hiérarchiser les profils et ne doivent pas être utilisés directement pour la conception de l'aile. D'une part, dans la configuration actuelle, l'aile voit le fluide arriver de face. En pratique, une incidence est nécessaire (un voilier ne peut avancer face au vent). Nous avons complété cette étude pour le profil NACA 4418 avec une étude 3D pour prendre en compte les effets tridimensionnelles des écoulements et déterminer la force vélique propulsive dans différents cas de fonctionnement.

3.1.2 Étude tridimensionnelle des efforts aérodynamiques sur l'aile

Afin de compléter l'étude 2D sur le choix du profil de l'aile des calculs ont été menés afin d'estimer les efforts aérodynamiques. Cette campagne de simulation 3D a été faite avec le code Fine/marine. Comme visible sur la figure Fig. 3.18 l'aile rigide est rattachée au reste de la structure via un mât central au bout duquel une liaison rotule permettra l'orientation de l'aile par rapport au vent. Pour commander l'orientation de l'aile, un système de quatre moyens de tension seraient utilisés. Ainsi, l'estimation des efforts aérodynamiques va permettre de dimensionner les actionneurs à utiliser.

Une aile très simple a été modélisée pour cette étude préliminaire. Il s'agit d'une extrusion d'un profil NACA 4418 de corde $c = 2$ m sur une envergure $s = 2,5$ m. Le bord de fuite a été tronqué. Après troncature, celui-ci a une épaisseur de 2 cm et la nouvelle corde est diminuée à $c = 1,97$ m.

L'étude est faite à l'aide du logiciel FINE/Marine.

3.1.2.1 Cadre de l'étude

Le choix des angles de Cardan a été retenu afin de définir l'orientation de l'aile. Il s'agit d'effectuer une suite de trois rotations dans les bases locales obtenues successivement. Le corps est alors tourné

des angles successifs de lacet ψ , tangage θ et roulis ϕ , comme expliqué en Fig. 3.4.

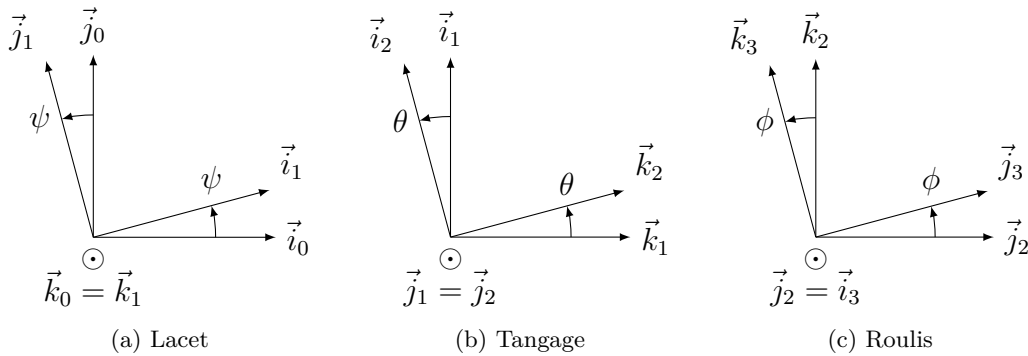


Fig. 3.4 – Angles de Cardan

Les détails mathématiques sont expliqués dans l'annexe A de la thèse [3] téléchargeable ici². Le centre de rotation est le point du bord d'attaque de l'aile rigide situé dans son plan médian.

Les quatre paramètres choisis pour cette étude sont les trois angles de Cardan ψ , θ et ϕ , ainsi que la valeur du champ de vitesse lointain imposé U , c'est-à-dire la vitesse du vent. Les valeurs de ces paramètres varient linéairement d'un minimum à un maximum d'un pas constant, comme indiqué dans le Tab. 3.4.

Afin de simplifier l'étape de maillage et de maintenir une qualité de celui-ci la meilleure possible, il a été décidé de n'effectuer qu'une seule génération de maillage pour chaque valeur de vitesse en prenant tous les angles de Cardan à 0° . Il est nécessaire de faire un maillage différent pour chaque vitesse car le nombre de couches de cellules à insérer autour du corps pour capturer la couche visqueuse dépend de la vitesse de référence.

paramètre	U (kn)	ψ (deg)	θ (deg)	ϕ (deg)
valeur minimale	5	0	-10	0
valeur maximale	20	90	20	20
pas	5	10	5	5

Tab. 3.4 – Valeurs du jeu de paramètres de l'étude.

Le domaine de calcul choisi est un pavé droit de longueur telle qu'une distance de $10c$ est laissée en amont de l'aile et $20c$ en aval, soit une longueur totale de $31c$. De chaque côté de l'aile, un espace de $7,5s$ est laissé, soit une largeur totale de $16s$. Finalement, un espace de $10c$ est laissé au dessus et au dessous de l'aile. Le domaine obtenu est schématiquement représenté en Fig. 3.5.

Pour obtenir l'orientation choisie, trois rotations sont alors appliquées au maillage effectué avec le foil « à plat ». Nous obtenons alors, par exemple, un maillage similaire à celui visible sur la Fig. 3.6. Il contient environ un million de cellules.

Le problème étant indépendant du temps, le calcul est fait en condition stationnaire, c'est-à-dire sans résolution temporelle. L'aile est immobile dans le domaine et une vitesse de fluide est imposé sur les frontières de celui-ci. Ce champ U aux frontières est toujours horizontal et tel que $\vec{U} = U \vec{i}_0$, où $\vec{i}_0$ est un vecteur unitaire horizontal. Le critère d'arrêt d'un calcul est fixé à 2000 itérations ou convergence de 5 ordres.

Le Tab. 3.4 impose 1400 calculs. Ceux-ci sont lancés sur le cluster MUSE. Chaque calcul est effectué sur la totalité d'un nœud, c'est-à-dire 28 cœurs. En pratique, les 5 ordres de convergence demandés ne

2. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01719696/file/Robert2017.pdf>

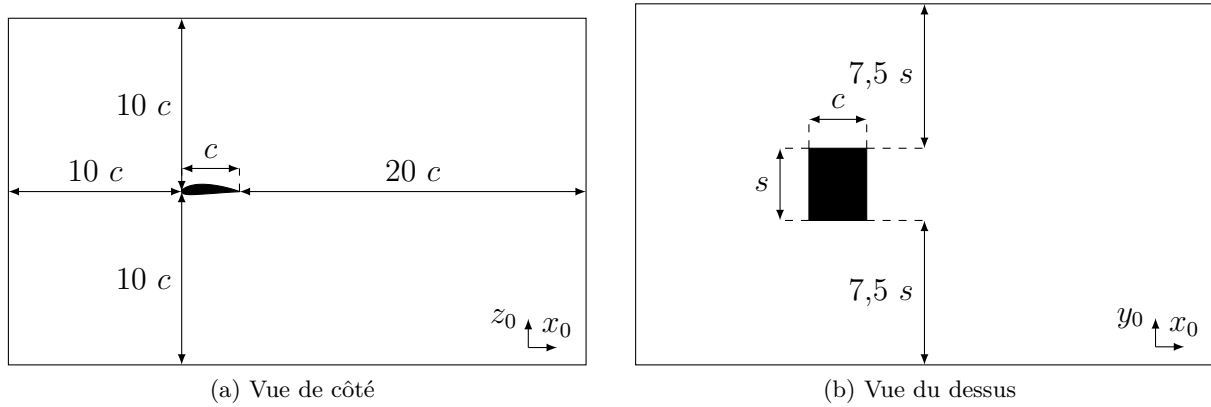


Fig. 3.5 – Schéma du domaine de calcul

sont jamais atteints et il est nécessaire d'effectuer les 2000 itérations. Cela nécessite environ 20 min en temps réel ou 9 h et 20 min en temps CPU. Sachant que nous pouvons utiliser deux nœuds, la durée de calcul de tous les points demandés représente alors d'environ 9,7 jours en temps réel ou 13 000 h en temps CPU.

3.1.2.2 Résultats

Les résultats numériques des efforts obtenus pour l'ensemble des calculs ne sont pas fournis dans ce rapport, étant donné la grande quantité d'informations. Ils sont disponibles dans un fichier de type CSV en complément du présent rapport.

Nous avons choisi d'exploiter la résultante des efforts aérodynamiques s'exerçant sur l'aile. Celle-ci est étudiée en la séparant en deux : la norme F_{xy} de la projection dans le plan horizontal, $F_{xy} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$, et la composante verticale F_z . Ces deux quantités sont représentées sous deux formes, décrites ci-après. L'angle α formé par le vecteur vitesse du vent $\vec{U}$ et le vecteur $\vec{F}_{xy}$, tel que $\alpha = (\vec{U}, \vec{F}_{xy})$, est également considéré et présenté sous la première forme.

La première façon de représenter F_{xy} et F_z est celle des Fig. B.6 et B.7. L'angle α est représenté de la même manière que ces forces sur la Fig. B.8. Les forces et α sont tracés en fonction de l'angle de lacet ψ , sous la forme de plusieurs graphiques polaires, pour l'ensemble des vitesses U considérées. Sur chaque graphique, les valeurs de l'angle de roulis ϕ et de tangage θ sont fixées. Les valeurs de ϕ et θ sont respectivement limitées³ aux ensembles $\{0^\circ; 10^\circ; 20^\circ\}$ et $\{-10^\circ; 0^\circ; 10^\circ; 20^\circ\}$. L'angle ϕ croît en regardant de la gauche vers la droite et l'angle θ croît de bas en haut. Pour rappel, un angle de lacet ψ nul indique un vent arrivant en face de l'aile. L'angle de lacet ne correspond pas à l'angle formé par les vecteurs vitesse du vent et celui du *vent apparent* qui serait appliqué au bateau car, ici, l'aile est immobile dans le domaine dans lequel une vitesse de fluide est imposée.

Comme cela pouvait être trouvé intuitivement, les forces F_{xy} et F_z sont plus importantes pour les plus grandes valeurs de ϕ et θ , les valeurs maximales des forces étant aussi atteintes pour les valeurs maximales des angles testées. Nous avons alors $F_{xy,max} = 180 \text{ N}$ et $F_{z,max} = 380 \text{ N}$. Il apparaît également que les efforts sont maximaux pour un angle de lacet d'environ 40° . Les efforts maximaux locaux (dans chaque graphique pris séparément) ne sont pas atteints à chaque fois pour cette même valeurs d'angle de lacet, en particulier pour le cas très spécifique où $\theta = -10^\circ$, c'est-à-dire un cas où il n'y a que peu voire pas de portance et où la composante horizontale n'est pas motrice.

L'angle α n'est pas aussi simple à interpréter. Nous pouvons néanmoins donner quelques remarques.

3. Les mêmes figures sont disponibles en complément du rapport pour l'ensemble des valeurs de ϕ et θ testées.

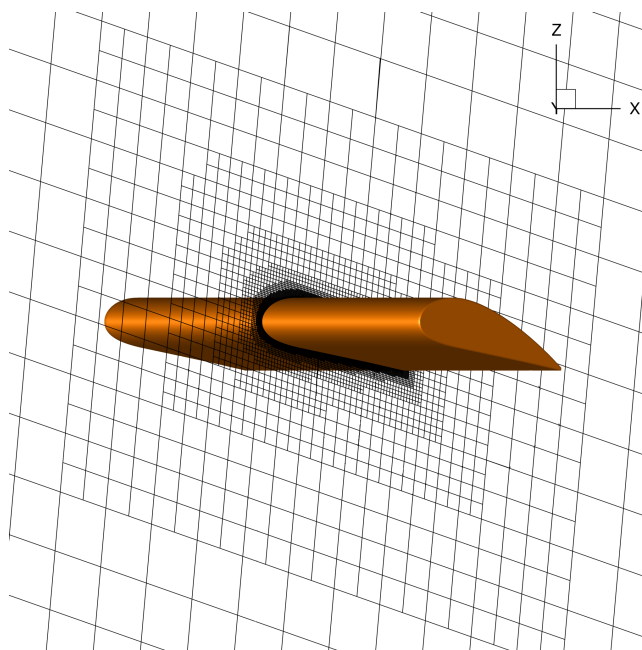


Fig. 3.6 – Visualisation d’une coupe en $Y = 0$ m d’un exemple de maillage, pour un domaine orienté avec les angles de Cardan $\psi = 60^\circ$, $\theta = 10^\circ$ et $\phi = 0^\circ$, et ajout de l’aile rigide (en orange).

La principale réside dans le fait qu’il ne dépend presque pas de la valeur de la vitesse, pour la gamme de vitesses testée, car les différentes courbes se superposent. Les forces atteignent leurs maxima en $\psi = 40^\circ$ et pour des angles ϕ et θ les plus grands possibles, c’est-à-dire quand ces derniers valent 20° . Dans ce cas précis, α vaut environ -33° . Pour ϕ et θ variant dans l’intervalle $[10^\circ, 20^\circ]$, α se situe alors dans $[-70^\circ, -20^\circ]$.

La seconde façon de représenter les forces est proposée dans les Fig. B.9 et B.10. Les valeurs sont affichées dans des courbes de niveaux en fonction des deux variables indépendantes ϕ et θ . Sur chaque graphique, les valeurs de vitesse U et d’angle de lacet ψ sont fixées. Toutes les valeurs de U testées sont affichées. A contrario les valeurs de ψ sont limitées aux angles suivant $\{0^\circ; 30^\circ; 60^\circ; 90^\circ\}$. Les mêmes figures sont disponibles en complément du rapport pour l’ensemble des valeurs de θ testées. La vitesse U croît en regardant du bas vers le haut et l’angle ψ croît de gauche à droite.

Une nouvelle fois, les résultats qualitatifs correspondent à ce que nous pouvions attendre. En effet, les forces F_{xy} et F_z augmentent avec la vitesse et sont maximales pour un intervalle angulaire situé entre 30° et 60° pour ψ , ce qui confirme l’angle de 40° trouvé via les Fig. B.6 et B.7.

3.1.2.3 Conclusions

Les simulations présentées dans ce rapport ont permis de quantifier et caractériser les forces aérodynamiques s’exerçant sur l’aile rigide, suivant quatre paramètres variant dans des intervalles assez larges.

Nous savons que la résultante aérodynamique est maximale pour une vitesse de 20 kn, pour un angle de lacet d’environ 40° et pour les valeurs d’angles maximales testées pour le tangage et le roulis, c’est-à-dire pour 20° chacun. La composante horizontale de la résultante vaut alors 180 N et la composante verticale 380 N, alors que l’angle formé par le vecteur vitesse du vent et la composante horizontale est d’environ -33° .

3.2 Études hydrodynamiques

3.2.1 Calcul de la surface portante théorique de chaque hydrofoil

3.2.1.1 Hypothèses et critères

Nous supposons que le bateau a une masse totale M de 140 kg. L'ASV possède quatre hydrofoils identiques et la charge est répartie équitablement entre ceux-ci. Pour simplifier la conception de l'hydrofoil, celui-ci est une simple extrusion du profil H105, bord de fuite tronqué, et de corde $c = 16$ cm. La longueur d'extrusion est donc confondue avec l'envergure b du foil et sa surface portante est un rectangle de longueur b et de largeur c . Il est souhaité que le bateau décolle à une vitesse U de 5 kn et pour un angle d'incidence des foils $\alpha = 5^\circ$.

3.2.1.2 Théorie des lignes portantes

D'après la théorie des lignes portantes, il est possible d'estimer le coefficient de portance C_l d'un hydrofoil généré par un profil donné à partir de la connaissance du coefficient de portance 2D du même profil et de l'allongement AR de l'hydrofoil, ce dernier étant défini comme le rapport du carré de l'envergure de l'hydrofoil b sur la surface portante S . La loi permettant cette estimation est défini par

$$C_l(\alpha) = C_{l_{2D\alpha}} \frac{AR}{AR+2} (\alpha - \alpha_0) , \quad (3.4)$$

où $C_{l_{2D\alpha}}$ est la pente du coefficient de portance en 2D par rapport à l'angle d'attaque α , α_0 est l'angle d'attaque tel que $\alpha_0 = \alpha(C_l = 0)$, et C_l est le coefficient de portance de l'hydrofoil 3D. Il est à noter que les C_l (2D ou 3D) varient en fonction du nombre de Reynolds $Re = \frac{\rho L_{ref} U_{ref}}{\mu}$, c'est-à-dire en fonction du fluide considéré (masse volumique ρ et viscosité dynamique μ) et du corps considéré (sa vitesse de référence U_{ref} ou celle du fluide, et sa longueur de référence L_{ref} , ici égale à la corde de l'hydrofoil c). Cette loi (3.4) est valide pour des allongements suffisamment grands ($AR > 4$).

Nous pouvons remarquer que le passage des résultats 2D au 3D est simplement donné par la valeur du rapport $\frac{AR}{AR+2}$. Celui-ci est tracé en fonction de AR en Fig. 3.7. Pour un allongement tendant vers l'infini, ce rapport tend vers 1 et le C_l en 3D est alors égal au C_l en 2D.

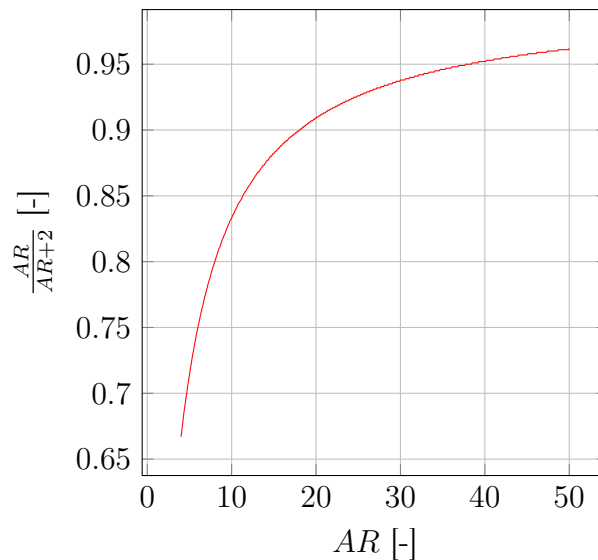


Fig. 3.7 – Tracé de la courbe donnant le rapport $\frac{AR}{AR+2}$ en fonction de l'allongement AR (*aspect ratio*).

Etant donné que la surface portante est rectangulaire pour l'hydrofoil considéré, l'allongement AR est donc ici simplement égal à $\frac{b}{c}$.

Le coefficient de portance s'écrit aussi, selon sa définition, comme

$$C_l(R_e, \alpha) = \frac{L(R_e, \alpha)}{\frac{1}{2} \rho U^2 S}, \quad (3.5)$$

où L est ici assimilé au quart du poids total du bateau. En prenant une accélération de la pesanteur $g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, chaque foil doit donc générer une portance de 350 N pour faire voler le bateau.

En introduisant dans (3.4) la formulation de C_l donnée en (3.5), il vient

$$\frac{L}{\frac{1}{2} \rho U^2 b c} = C_{l_{2D\alpha}} \frac{\frac{b}{c}}{\frac{b}{c} + 2} (\alpha - \alpha_0). \quad (3.6)$$

Comme U , α , L , ρ , c et $C_{l_{2D\alpha}}$ sont fixés, il convient donc d'ajouter une constante K les regroupant, définis par

$$K = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho U^2 C_{l_{2D\alpha}} (\alpha - \alpha_0)}. \quad (3.7)$$

Nous pouvons alors simplifier l'écriture de (3.6) comme le polynôme du second degré suivant

$$b^2 - \frac{K}{c} b - 2 K = 0. \quad (3.8)$$

Son discriminant est strictement positif et seule une des deux solutions est admissible car positive. L'envergure théorique permettant de générer la portance adéquate vaut donc

$$b_{th} = \frac{K}{c} + \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{K}{c}\right)^2 + 8 K}. \quad (3.9)$$

3.2.1.3 Application numérique

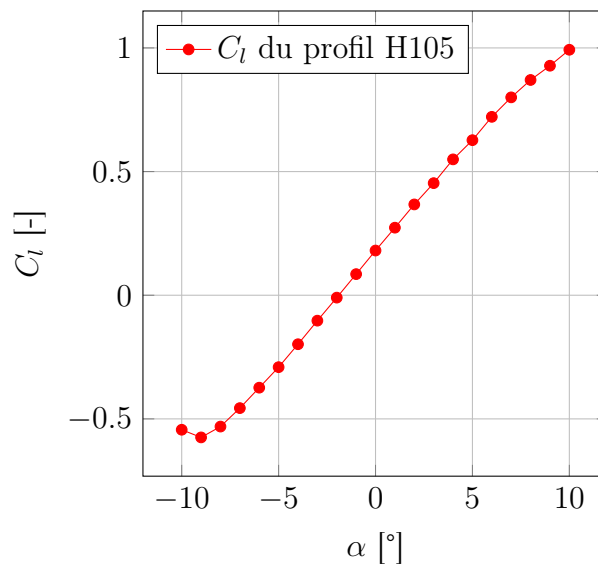
D'après des simulations 2D réalisées à l'aide de FINE/Marine au préalable, nous pouvons tracer en Fig. 3.8 le coefficient de portance en fonction de l'angle d'incidence, obtenu avec des paramètres identiques que ce que nous appliquons dans la suite du rapport. Ceux-ci sont synthétisés dans le Tab. 3.5. La valeur de la pente $C'_{l_{2D\alpha}}$ est calculée dans l'intervalle angulaire $[-5^\circ; 5^\circ]$ et vaut donc 5,3070. Nous pouvons aussi en déduire la valeur de l'angle d'incidence à C_l nul. Il vaut $\alpha_0 = -1,9^\circ$. Toutes les constantes sont alors définies pour calculer l'envergure théorique. En appliquant (3.9), nous trouvons

$$\boxed{b_{th} = 1,293 \text{ m}}. \quad (3.10)$$

Cette valeur d'envergure semble importante. Elle s'explique par le fait que nous souhaitons faire décoller l'ASV à basse vitesse (5 kn) tout en ayant un angle d'incidence pas trop élevé (5°).

quantité	symbole	valeur
masse volumique de l'eau	ρ_{eau}	$998,4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
masse volumique de l'air	ρ_{air}	$1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
viscosité dynamique de l'eau	μ_{eau}	$1,043\,62 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
viscosité dynamique de l'air	μ_{air}	$1,85 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
corde	c	16 cm
vitesse du fluide ou de l'hydrofoil	U	$2,572\,22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
pente de C_l par rapport à α	$C_{l_{2D\alpha}}$	5,3070
angle d'incidence tel que $C_l = 0$	α_0	$-1,9^\circ$

Tab. 3.5 – Constantes utilisées dans ce rapport.

Fig. 3.8 – Courbe du coefficient de portance C_l du profil H105 en fonction de l'angle d'incidence α obtenu par simulation numérique avec FINE/Marine pour une vitesse $U = 5 \text{ kn}$, une corde $c = 16 \text{ cm}$, une masse volumique $\rho = 998,4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ et une viscosité dynamique $\mu = 1,043\,62 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$.

α [°]	C_l [-]	α [°]	C_l [-]
-10	-0,543917	1	0,273160
-9	-0,574889	2	0,367151
-8	-0,531047	3	0,453272
-7	-0,456408	4	0,549358
-6	-0,373787	5	0,626992
-5	-0,290843	6	0,721328
-4	-0,198098	7	0,800128
-3	-0,102814	8	0,870424
-2	-0,009681	9	0,927993
-1	0,085344	10	0,992590
0	0,180744		

Tab. 3.6 – Valeurs tabulées du coefficient de portance C_l du profil H105 en fonction de l'angle d'incidence α obtenu par simulation numérique avec FINE/Marine pour une vitesse $U = 5 \text{ kn}$, une corde $c = 16 \text{ cm}$, une masse volumique $\rho = 998,4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ et une viscosité dynamique $\mu = 1,043\,62 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$.

3.2.2 Simulations de l'écoulement autour d'un hydrofoil en monofluide

Afin de vérifier le calcul de l'envergure de l'hydrofoil calculée via la théorie des lignes portantes, nous proposons de vérifier le résultat obtenu par des simulations numériques. En pratique, celles-ci ont été effectuées en amont. Bien qu'un grand nombre de configurations a été testé nous avons choisi de présenter tous les cas simulés.

3.2.2.1 Modélisation

Les simulations présentées dans cette section ne prennent pas en compte la surface libre (simulation *monofluide*). L'hydrofoil considéré est immobile dans le fluide en mouvement et celui-ci est de l'eau, dont les paramètres de masse volumique et de densité sont ceux donnés en Tab. 3.5. Comme c'est un problème stationnaire, le mode de résolution des équations l'est aussi. Cela permet d'avoir des temps CPU assez faibles⁴, même avec des maillages faits de plusieurs millions de cellules.

3.2.2.2 Domaine de calcul

Le domaine de calcul est affiché en Fig. B.12. L'origine du domaine est confondu avec le centre *géométrique* de l'hydrofoil dans sa position originale, c'est-à-dire le point situé à mi-distance des coordonnées minimale et maximale dans chaque direction, quand l'hydrofoil ne possède aucune incidence. Le problème est symétrique par rapport au plan médian de l'hydrofoil. Cela permet de réduire de moitié le nombre de cellules. Le plan médian du foil est donc confondu avec la face YMIN du domaine. Des distances de 10 et 20 cordes sont laissées, respectivement, en amont et en aval de l'hydrofoil (faces XMIN et XMAX). Une distance de trois fois l'envergure du foil est laissée entre l'extrémité de celui-ci et la face latérale (YMAX). La distance YMIN-YMAX varie donc en fonction de l'envergure du foil testé. Dans le sens vertical, une distance de 20 cordes est laissée de part et d'autre du foil (faces ZMIN et ZMAX). Le foil est tourné d'un angle correspondant à l'incidence α souhaitée, suivant l'axe $\vec{y}$ et le centre de rotation est le centre géométrique précédemment décrit.

3.2.2.3 Maillage

Le logiciel Hexpress est utilisé pour réaliser le maillage. Les tailles cible de cellules sont définies de manière à obtenir au moins 200 cellules par longueur de corde dans la direction longitudinale, au moins 20 cellules par longueur de corde dans la direction transversale, et une épaisseur de cellule égale au plus à un quarantième de l'épaisseur de l'hydrofoil. Le paramètre de diffusion est mis à 3, c'est-à-dire que les cellules ne peuvent doubler en taille qu'après une succession de 3 couches de cellules de même taille, en dehors la zone d'insertion des couches visqueuses. Ce résultat est observable sur la Fig. B.11.

Un maillage est généré pour chaque configuration, c'est-à-dire dès que l'envergure ou l'incidence change. Suivant l'envergure considérée, et dans une moindre mesure suivant l'incidence considérée, le nombre total de cellules variaient d'environ un demi million (pour $AR = 1$) à environ cinq millions (pour $AR = 62,5$).

3.2.2.4 Paramètres de simulation

Comme précédemment mentionné, les simulations sont faites en résolution stationnaire et en monofluide (milieu fluide composé seulement d'eau pure). Cela veut dire qu'il n'y a pas de résolution temporelle mais uniquement une résolution spatiale. L'hydrofoil est fixe dans le domaine fluide. Le fluide progresse horizontalement, de la gauche vers la droite, à une vitesse uniforme $U = 2,572\,22\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, c'est-à-dire 5 kn. Une loi de paroi est appliquée sur les parois du foil pour capturer la couche limite.

4. D'environ deux heures par simulation sur la totalité des 28 processeurs d'un nœud sur le cluster MUSE.

Sur les faces latérales externes du domaine, ainsi qu'en condition initiale pour toutes les cellules, une vitesse $(U, 0, 0)$ est imposée. La pression est constante sur les faces verticales externes du domaine. Le critère d'arrêt du calcul est le premier obtenu parmi les deux suivants : 4000 itérations ou 5 ordres de convergence.

3.2.2.5 Cas testés

Nous avons fait une matrice de 21 calculs avec trois différents angles d'incidence α et sept envergures b , répertoriés dans le Tab. 3.7.

α [°]	b [m]
0	0,16
2,5	0,32
5	0,64
	1
	2
	5
	10

Tab. 3.7 – Ensemble des valeurs de paramètres utilisés pour l'incidence α de l'hydrofoil et de son envergure b dans les simulations de l'écoulement autour d'un hydrofoil en monofluide

3.2.2.6 Résultats

Les résultats numériques de la traînée D , de la portance L et du moment au quart de corde M , ainsi que leurs coefficient correspondants C_d , C_l et C_m , sont tous synthétisés dans le Tab. 3.8. Nous constatons qu'il est impossible d'obtenir la cible de portance de 350 N pour une envergure inférieure au mètre et pour un angle d'incidence peu élevé (inférieur à 5°).

3.2.2.7 Comparaison des résultats des simulations numériques à ceux obtenus à partir de la théorie de la Ligne Portante

En utilisant le modèle provenant de la théorie des lignes portantes (3.4), nous pouvons calculer C_l les envergures considérées, c'est-à-dire pour différents allongements AR , et aussi pour les angles d'incidence α testés. Les résultats des C_l obtenus par simulation sont tracés en noir sur la Fig. 3.9 en fonction de α et pour différents AR représentés par des symboles différents. Les résultats théoriques sont représentés identiquement mais en couleur rouge.

Nous constatons un assez bon accord entre les résultats théoriques et numériques. La superposition des courbes n'est pas parfaite mais la tendance est très bien représentée, surtout pour une phase initiale de dimensionnement de foil, comme dans notre cas. Cela permet de dire que pour un futur dimensionnement de foil, il sera possible d'utiliser le modèle afin de réduire le nombre de simulations. Il est à noter que la précision du modèle est fortement dépendante à la valeur de l'angle d'incidence α_0 .

3.2.2.8 Calcul de la surface portante nécessaire

Nous estimons ici l'envergure b_{sim} obtenue par simulation numérique permettant de faire voler le bateau. Pour ce faire, nous pouvons commencer par tracer l'évolution de la portance L obtenue dans les simulations, pour un angle $\alpha = 5^\circ$, en fonction de b . Ceci est fait en Fig. 3.10. Nous notons une

b [m]	α [°]	D [N]	L [N]	M [N · m]	C_d [-]	C_l [-]	C_m [-]
0.16	0	1.523	4.963	-0.507	0.018015	0.058697	-0.037512
	2.5	1.874	11.242	-0.454	0.022159	0.132958	-0.033560
	5	2.667	18.844	-0.480	0.031542	0.222868	-0.035493
0.32	0	2.781	13.434	-1.151	0.016444	0.079441	-0.042531
	2.5	3.539	31.357	-1.011	0.020926	0.185427	-0.037359
	5	5.355	53.565	-1.117	0.031665	0.316755	-0.041273
0.64	0	5.291	33.279	-2.431	0.015644	0.098396	-0.044915
	2.5	6.834	85.432	-2.372	0.020206	0.252598	-0.043836
	5	10.187	140.422	-2.476	0.030119	0.415187	-0.045747
1	0	8.141	61.375	-4.054	0.015405	0.116139	-0.047944
	2.5	10.235	152.996	-3.908	0.019368	0.289513	-0.046223
	5	15.112	253.099	-4.207	0.028596	0.478938	-0.049751
2	0	15.833	138.679	-8.344	0.014981	0.131211	-0.049343
	2.5	19.408	350.855	-8.203	0.018363	0.331961	-0.048510
	5	26.093	558.554	-7.901	0.024688	0.528475	-0.046721
5	0	38.257	377.608	-21.304	0.014479	0.142909	-0.050391
	2.5	44.582	955.024	-20.799	0.016873	0.361438	-0.049197
	5	56.958	1513.938	-19.611	0.021556	0.572964	-0.046387
10	0	74.732	788.090	-43.328	0.014141	0.149130	-0.051243
	2.5	87.774	1956.737	-41.590	0.016610	0.370273	-0.049188
	5	106.748	3138.194	-39.839	0.020200	0.593839	-0.047117

Tab. 3.8 – Traînée, portance et moment de tangage au quart de corde, et les trois coefficients correspondants, exercés sur l'hydrofoil pour sept valeurs d'envergure b et trois angles d'incidence α .

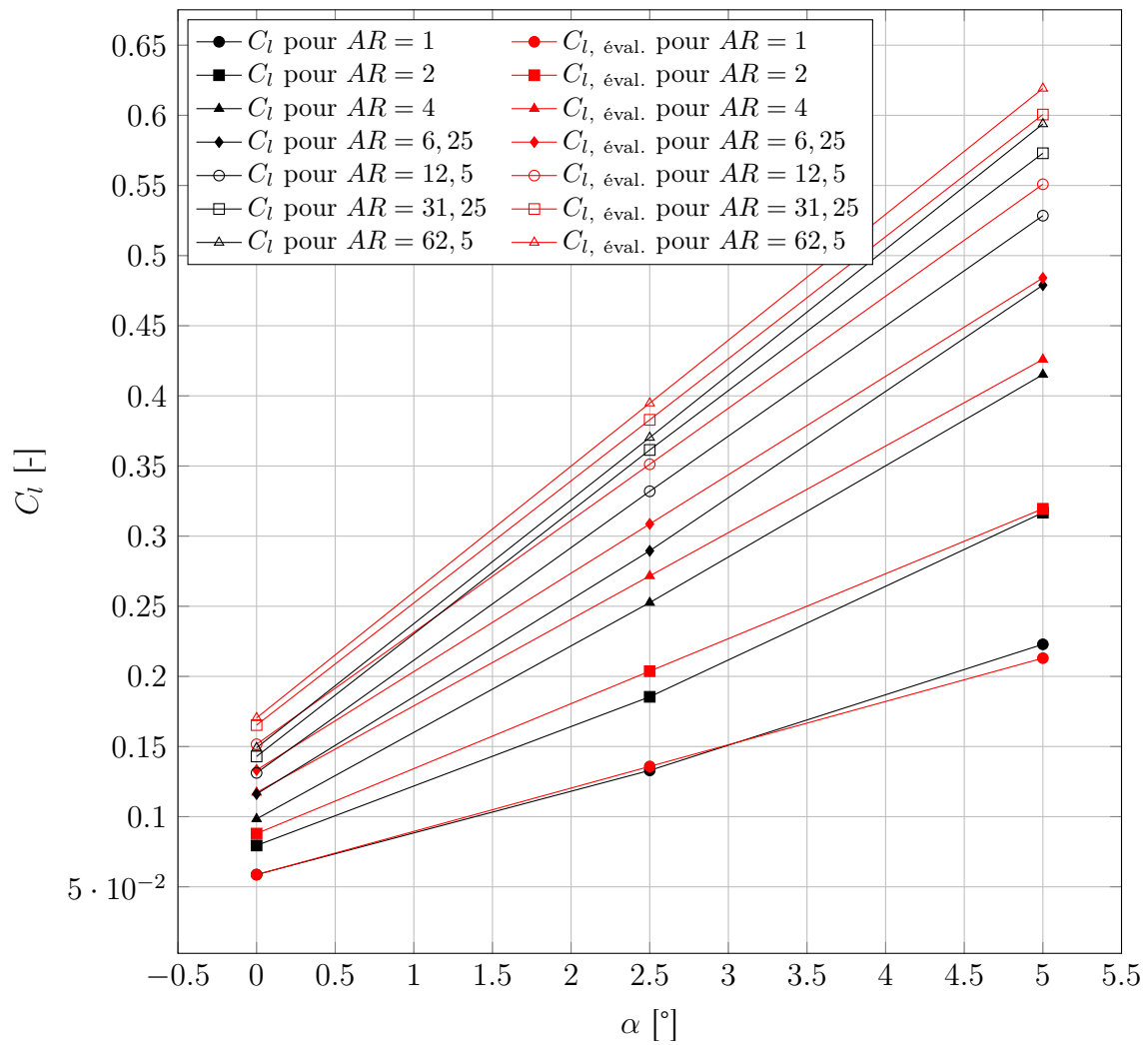


Fig. 3.9 – Tracé des coefficients de portance C_l obtenus par simulations numériques (en noir) et $C_{l, \text{éval.}}$ obtenus par évaluation théorique (en rouge) pour différentes valeurs d'allongement AR .

évolution linéaire de L par rapport à b pour $b \geq 1$. En effet, le carré du coefficient de corrélation linéaire vaut 0,999 933. Nous interpolons donc pour obtenir une portance de 350 N et nous obtenons

$$b_{sim} = 1,336 \text{ m} . \quad (3.11)$$

La valeur obtenue par simulation est donc très proche de la valeur du modèle (seulement 3,3 % de plus). Par la suite, nous prendrons une valeur d'envergure légèrement arrondie, c'est-à-dire

$$b = 1,34 \text{ m} . \quad (3.12)$$

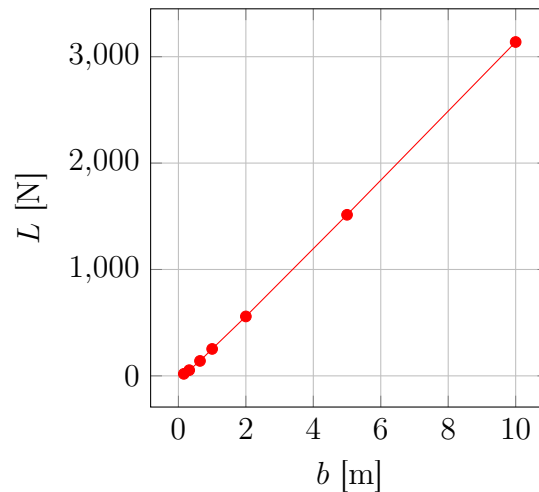


Fig. 3.10 – Tracé de la portance L obtenue pour un angle d'attaque $\alpha = 5^\circ$ en fonction de l'envergure b de l'hydrofoil.

3.2.3 Simulations de l'écoulement autour de deux hydrofoils en monofluide

Après avoir dimensionné un hydrofoil indépendamment des autres éléments, il convient de s'assurer que le sillage du foil avant ne perturbe pas trop celui du foil arrière. Nous procédons donc à de nouvelles simulations, similaires aux précédentes décrites en 3.2.2.

3.2.3.1 Modélisation

La modélisation est similaire à celle décrite en 3.2.2.1.

3.2.3.2 Domaine de calcul

Le domaine de calcul est similaire à celui décrit en 3.2.3.2 et il est affiché en Fig. B.13. L'espace laissé en amont est le même et se réfère au foil avant (AV). L'espace laissé en aval est aussi identique mais se réfère cette fois au foil arrière (AR). Les deux hydrofoils sont distants de 2,1 m l'un de l'autre (centre à centre), dans le sens longitudinal, ce qui correspond à 75 % de la longueur totale de la coque considérée en 3.2.5. La position verticale du foil AV est fixe et de $z_{\text{foil AV}} = -1,032$ m. Celle du foil AR est telle que $z_{\text{foil AR}} = z_{\text{foil AV}} + \Delta z$, où Δz est soit nul soit égal à $\pm \frac{3}{2}c$. L'incidence des deux foils est identique et égal à $\pm 5^\circ$. Le plan de symétrie n'est plus le plan médian des foils (qui restent tous les deux toujours coplanaires) mais le plan médian de l'ASV. Cela est modifié pour tenir compte de l'éventuelle interaction entre les côtés babord et tribord. En effet, comme les foils ont une grande envergure et que la distance entre les plans médians de chaque coque n'est fixée qu'à deux mètres, il est possible qu'une interaction apparaisse.

3.2.3.3 Maillage

Les paramètres du maillage sont identiques à ceux décrits en 3.2.2.3. Le nombre total de cellules est d'environ $7,3 \cdot 10^6$ pour tous les maillages. Le maillage pour lequel $\alpha = 5^\circ$ et $\Delta z = 0$ m est affiché en Fig. B.14.

3.2.3.4 Paramètres de simulation

Les paramètres de simulations sont identiques à ceux décrits en 3.2.2.4.

3.2.3.5 Cas testés

Les deux incidences et trois positions relatives du foil arrière par rapport au foil avant sont répertoriées dans le Tab. 3.9.

α [°]	Δz [m]
-5	-0,24
+5	0
	+0,24

Tab. 3.9 – Ensemble des valeurs de paramètres utilisés pour l'incidence α des hydrofoils et de la différence de position verticale Δz du foil arrière (AR) par rapport au foil avant (AV) pour les simulations de l'écoulement autour de deux hydrofoils en monofluide

3.2.3.6 Résultats

Les portances L obtenues pour les deux foils AV et AR et pour les six calculs sont tracées en fonction de Δz sur la Fig. 3.11. En Fig. 3.11a sont représentées les résultats pour $\alpha = 5^\circ$, alors qu'en Fig. 3.11b, ce sont les résultats pour $\alpha = -5^\circ$. Pour $\alpha = 5^\circ$, nous constatons que la portance du foil AV est constante et égal à 370 N, quelle que soit Δz . En revanche, la portance du foil AR est amoindrie par rapport à la première. Celle-ci est la plus faible de 23 % quand les plans porteurs sont à la même position verticale. Cette perte est moins importante quand le foil AR est au dessus du foil AV (19 %) ou au dessous (20 %). Pour $\alpha = -5^\circ$, les tendances sont similaires mais avec des portances négatives.

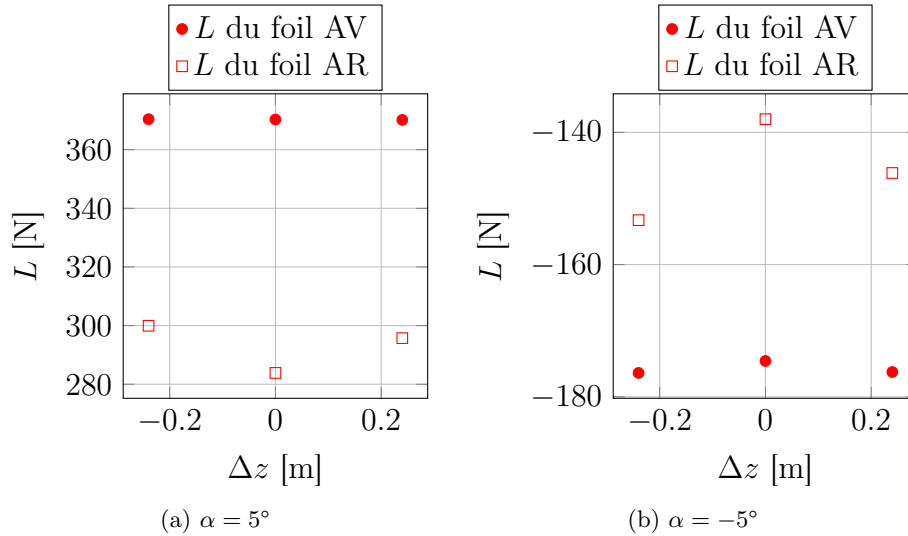


Fig. 3.11 – Tracé des portances L sur les foils avant (AV) et arrière (AR) obtenues pour un foil AV positionné à une distance $h = 1,032$ m de la surface libre et pour un foil AR écarté de Δz par rapport au foil AV.

Les pertes de portance du foil AR observées dans ces simulations numériques sont probablement plus importantes en réalité. En effet, comme nous pouvons l'observer sur la Fig. B.14, le maillage ne permet pas de bien capturer le sillage des foils, en particulier celui du foil AV qui vient rencontrer le foil AR. Une simulation avec un maillage où une boîte de raffinement englobant les deux foils a été réalisée (cas avec $\alpha = 5^\circ$ et $\Delta z = 0$ m). La perte de portance passe alors de 23 % à 27 %.

3.2.3.7 Analyse

Il apparaît clairement que décaler verticalement le foil AR ne permet pas de réduire substantiellement la perte de portance. Dans le but de trouver la raison de cette perte, nous avons regardé les lignes de courant autour des deux hydrofoils. Elles sont affichées pour le cas avec $\alpha = 5^\circ$ et $\Delta z = 0$ m, dans le plan médian (à $y = 1$ m), en Fig. B.15. Nous nous apercevons que le flux de vitesse est dévié vers le bas en aval du foil AR, ce qui a pour effet de diminuer l'angle d'incidence effectif du foil AR. Dans cette coupe, nous estimons la déviation à environ $1,5^\circ$.

Comme la portance évolue linéairement avec l'angle d'incidence (pour des angles pas trop grands), nous avons effectué une autre simulation où la configuration est identique à la différence près que l'angle d'incidence du foil AR est augmenté de $1,5^\circ$, soit un angle de $\alpha = 6,5^\circ$. Les résultats sont retranscrits dans le Tab. 3.10. Nous observons que cela permet de retrouver la quasi totalité de la portance du foil AV. Une perte d'environ 16 N est toujours présente mais ne représente plus qu'environ 4 %, ce qui est nettement moins que la perte initiale de 23 %, obtenue à finesse de maillage identique.

α (Foil AR) [°]	F_z (Foil AV) [N]	F_z (Foil AR) [N]
+5	370,3	283,9
+6,5	366,2	349,9

Tab. 3.10 – Variation de portance suite à la modification de l'angle d'incidence α du foil arrière.

3.2.4 Simulations de l'écoulement autour de deux hydrofoils avec prise en compte de la surface libre

Cette partie vise à étudier l'influence de la surface libre sur la performance en portance des hydrofoils. Pour ce faire nous allons introduire deux fluides dans la modélisation. La prise en compte de celle-ci dans les simulations a un impact sur la modélisation et sur les temps CPU, c'est pourquoi il n'est pas possible d'étudier un grand nombre de configurations.

3.2.4.1 Modélisation

3.2.4.2 Domaine de calcul

Le domaine de calcul est quasi identique à celui décrit en 3.2.4.2. L'angle d'incidence des hydrofoils est fixe et de $\alpha = 5^\circ$ pour tous les cas. La différence principale est que la position verticale z des hydrofoils varient. Cependant, ils sont tous les deux au même z . De plus, nous avons $z = -h$, $h > 0$, où h est appelée immersion.

3.2.4.3 Maillage

En dehors de la zone de capture de la surface libre, le maillage est similaire à celui de la partie 3.2.3.

Pour capturer la surface libre, trois solutions sont possibles. Premièrement, nous pouvons utiliser un maillage où des cellules sont ajoutées autour de la position initiale de la surface libre. La simulation sera faite à nombre de cellules constant. Deuxièmement, nous pouvons aussi partir d'un maillage identique à celui de la partie 3.2.3 et utiliser au cours de la simulation (dès le premier pas de temps) une procédure de raffinement automatique de maillage, appelée AGR, utilisant un critère adapté à la capture de surface libre. Le nombre de cellules variera au cours de la simulation, avec un coût en temps CPU pour la génération des cellules, mais avec un nombre moyen de cellules a priori plus faible que dans le premier cas. Troisièmement, nous pouvons utiliser une hybridation des deux premières possibilités, avec un maillage initial contenant tout de même moins de cellules que dans le premier cas.

Nous avons les deux premières possibilités mais nous ne présentons dans ce rapport que des simulations où la première solution est utilisée. Une boîte de raffinement centrée autour de la position $z = 0$ m, dont l'épaisseur est de 10 cm, est utilisée. A l'intérieur, les cellules ont une épaisseur de 5 mm. Le nombre de cellules est d'environ $9,2 \cdot 10^6$ dans tous les cas étudiés.

3.2.4.4 Paramètres de simulation

A l'inverse des parties précédentes, une résolution temporelle est ici nécessaire pour la prise en compte de la surface libre⁵. Par ailleurs, nous modifions les conditions aux limites et initiales. Sur les quatres faces latérales externes, nous imposons une vitesse du fluide nulle. Nous mettons la même conditions pour les toutes les cellules à $t = 0$ s. Une rampe de vitesse est appliquée pour les hydrofoils. Ils passent d'une vitesse nulle à $U = 2,572\,22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ en une seconde et progressent vers les x négatifs. Les simulations sont arrêtées après vingt secondes de temps physique, ce qui permet d'obtenir des efforts convergés.

5. FINE/Marine utilise le terme *steady* à tort et devrait en fait indiquer que la résolution temporelle est faite à l'ordre 1, moins précise que l'ordre 2, mais suffisante pour des simulations de problèmes physiques tendant vers un état stationnaire.

3.2.4.5 Cas testés

Quatre simulations sont effectuées avec des valeurs d'immersion indiquées dans le Tab. 3.11, incrémentées de 25 cm à chaque fois.

h [m]
0,282
0,532
0,782
1,032

Tab. 3.11 – Quatre valeurs d'immersion utilisées pour les simulations de l'écoulement autour de deux hydrofoils avec la prise en compte de la surface libre.

3.2.4.6 Résultats

Les résultats de portance pour les deux foils sont tracés en fonction de l'immersion en Fig. 3.12. Comme cela était attendu, la portance du foil AV diminue quand l'immersion diminue. En revanche, la portance du foil AR suit la tendance inverse. Elle devient même supérieure à celle du foil AV pour une immersion proche de 0,4 m.

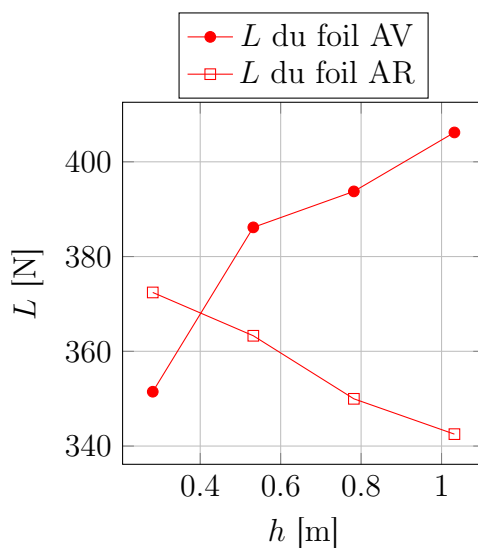


Fig. 3.12 – Tracé des portances L sur les foils avant (AV) et arrière (AR) obtenues pour une distance h à la surface libre, commune aux deux foils.

3.2.4.7 Analyse

Afin de mieux comprendre l'évolution a priori surprenante de la portance du foil AR en fonction de l'immersion, nous regardons à nouveau les lignes de courant autour des hydrofoils. Celles-ci sont tracées en Fig. B.17 pour chaque immersion, avec affichage de la fraction volumique en eau, afin de distinguer la position de la surface libre. Nous constatons que, à mesure que l'immersion diminue, les lignes de courant sont de plus en plus creusées. Le creux observé suit celui des vagues générées et celles-ci grossissent quand l'immersion diminue. Pour la plus petite immersion, $h = 0,282$ m, nous observons que la ligne de courant représentée immédiatement au dessus des deux hydrofoils est déviée

très en amont du foil AR. Cela a pour conséquence d'augmenter à nouveau l'angle d'incidence effectif sur celui-ci. Cela explique pourquoi, à cette immersion, sa portance est supérieure à celle du foil AV.

Il est à noter que les tendances observées ne se reproduiront peut-être pas dans un cas réaliste. La première raison d'en douter est que le système à deux (ou à quatre) foils considéré n'est pas à l'équilibre. En effet, nous pouvons certes considérer une symétrie dans le plan ZX mais nous devrions libérer les degrés de liberté en pillonnement (T_z) et en tangage (R_y). En supposant que les deux (ou quatre) foils puissent générer une portance globale permettant de faire décoller le bateau, cela entraînerait un rééquilibrage en T_z et R_y pour les deux foils rigidement liées, ce qui aurait pour conséquence de modifier la portance de chaque foil. En effet, à moins d'avoir un centre de gravité idéalement placé, la différence de portance entre les deux foils va créer un moment de tangage sur l'ensemble.

3.2.5 Simulation de l'écoulement autour des parties immergées d'un demi-catamaran avec prise en compte de la surface libre

Cette partie décrit une ébauche de travail entamé mais arrêté par manque de temps. La simulation peut éventuellement servir comme condition initiale d'une autre.

Ce travail a principalement été mené dans le but de produire du matériel servant à la communication du projet ASV.

3.2.5.1 Modélisation

Nous considérons ici une partie des corps immergés du catamaran, c'est-à-dire les quatre hydrofoils, les quatre jambes et les deux coques. Comme dans la partie 3.2.4, nous ne gardons qu'une moitié de cet ensemble (la partie tribord) par symétrie du problème. Les foils sont identiques à ceux précédemment utilisés. Ils sont générés avec le profil H105. Ils ont donc une corde de 16 cm et une envergure de 1,34 m. Ils sont distants de 2,1 m et à une même immersion initiale $h = 1,032$ m. L'angle du foil AV est de 5° et celui du foil AR est de $6,5^\circ$. Les jambes de foils sont générés à partir du profil NACA 0015. Elles ont une corde de 10,5 cm. Comme pour les hydrofoils, les jambes sont distantes de 2,1 m (centre à centre). La coque utilisée est celle de l'Overboat, dans sa version de longueur $L = 2,8$ m. Elle est verticalement placée de sorte à avoir son centre géométrique à altitude nulle.

3.2.5.2 Domaine de calcul

Le domaine de calcul est affiché en Fig. 3.13. Une distance L est laissée en amont du bateau et $2,5 L$ en aval. Un espace dans la direction transversale égal à L est laissé entre le point le plus distant du plan médian (confondue avec la face YMIN) et la face YMAX. Dans le sens vertical, un même espace L est laissé au dessus et au dessous du bateau par rapport, respectivement, au point le plus haut et le plus bas du bateau.

3.2.5.3 Maillage

La finesse du maillage au niveau des hydrofoils est la même que pour les parties précédentes. Pour les jambes, les tailles cibles sont définies de manière à avoir 100 cellules par longueur de corde dans la direction longitudinale, une épaisseur de cellule d'un dixième de l'épaisseur de la jambe dans le sens transversal, et 50 cellules dans la direction verticale. Pour le coque, il y a 150 cellules par longueur de corde dans le sens longitudinal, 100 cellules par longueur de maître-bau dans le sens transversal, et 50 cellules sur toute la dimension verticale. Afin de réduire environ de moitié le nombre de cellules, la diffusion n'est plus de 3 mais de 1 seulement. Cela a pour conséquence de diminuer la qualité de maillage mais la précision des résultats n'est pas recherchée à ce stade. Aucun raffinement de maillage n'est ajouté pour la capture de la surface libre dans ce maillage initial. Le maillage comporte initialement $10,6 \cdot 10^6$ cellules et est visible en Fig. 3.14 et dans l'annexe Fig. B.18.



(a) Vue isométrique

Fig. 3.13 – Vues du domaine de calcul utilisé pour la simulation de l'écoulement autour des parties immergées du demi-catamaran.

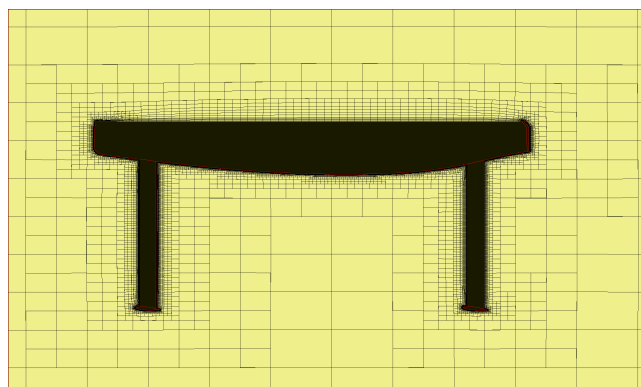
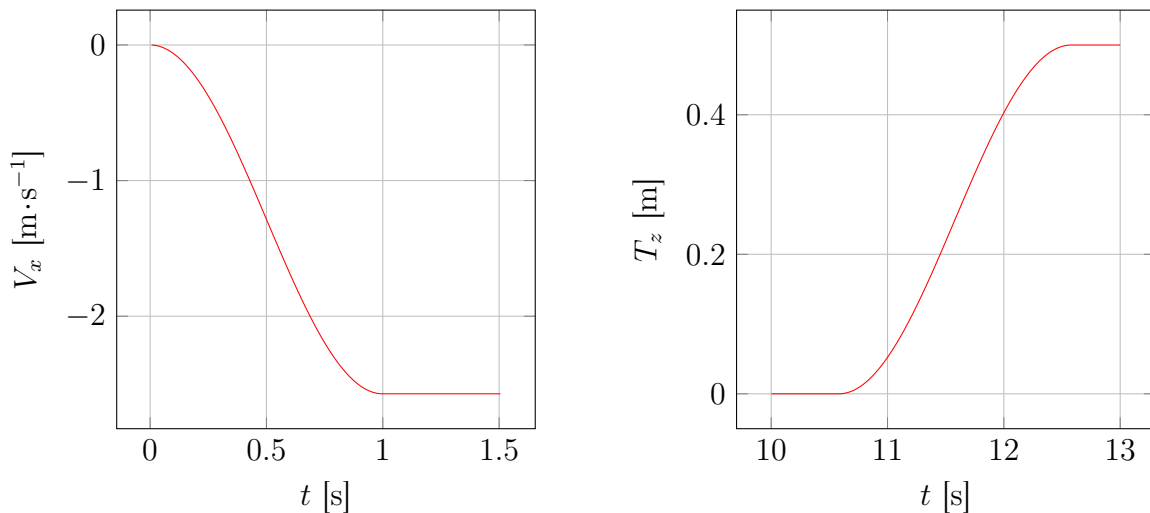


Fig. 3.14 – Vue du maillage utilisé pour la simulation de l'écoulement autour des parties immergées du demi-catamaran.

3.2.5.4 Paramètres de simulation

Le demi-catamaran est mis en mouvement en deux phases. Tout d'abord, nous appliquons une mise en vitesse dans la direction longitudinale comme effectuée en 3.2.3. Celle-ci est donnée par la courbe en Fig. 3.15a. Une fois la convergence des efforts obtenue, c'est-à-dire après environ 10,5 s, une mise en vol est imposée. Celle-ci provoque un déplacement vertical d'un demi-mètre en deux secondes, suivant la loi affichée en Fig. 3.15b.



(a) Mise en vitesse progressive (loi en demi-sinus) du bateau à partir de $t = 0$ s et jusqu'à $t = 1$ s, temps à partir duquel la vitesse longitudinale V_x est constante.

(b) Modification de la position verticale T_z (loi en demi-sinus) à partir de $t = 10,6$ s et jusqu'à $t = 12,6$ s, temps à partir duquel T_z est de nouveau constant.

Fig. 3.15 – Loïs de mouvement imposées au demi-catamaran.

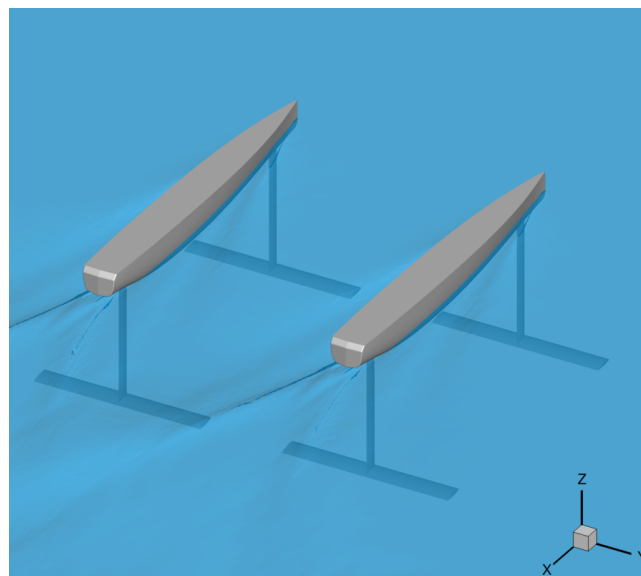
L'AGR est utilisé pour la capture de la surface libre. La taille cible des cellules est alors de 5 mm. Cela fait évoluer le nombre de cellules de $10,6 \cdot 10^6$ à $10,75 \cdot 10^6$ dans la phase d'accélération, puis un pic apparaît à $11,23 \cdot 10^6$ à la mise en vol, avant que le nombre total se stabilise à $10,85 \cdot 10^6$ à la fin de la simulation.

3.2.5.5 Résultats

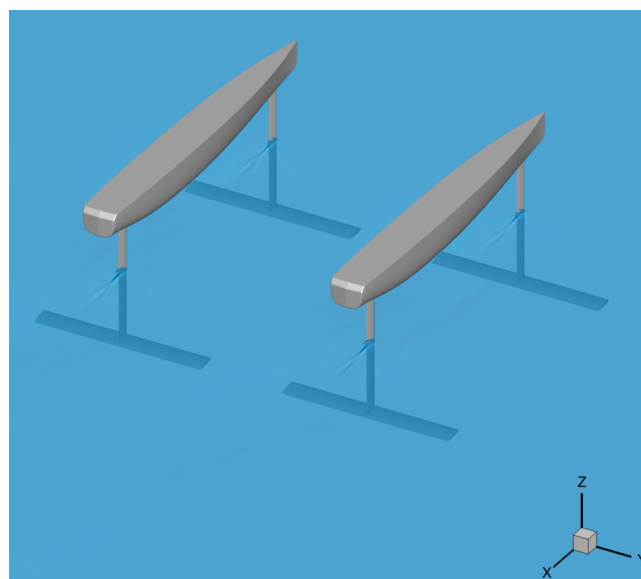
Le Tab. 3.12 recense les efforts convergés obtenus à l'issue de chacune des deux phases. Ces valeurs sont données à titre indicatif mais elles ne doivent pas servir dans un but de dimensionnement de l'ASV. En effet, ce dernier n'est pas à l'équilibre : il n'y a aucune résolution en pillonnement et en tangage. La Fig. 3.16 permet de visualiser la surface libre obtenue à la fin des deux phases.

	Total	Foil AV	Foil AR	Coque	Jambe AV	Jambe AR
Après la phase d'accélération						
F_x [N]	103,3	28,0	37,1	24,0	7,4	6,8
F_z [N]	1230,7	376,0	420,1	434,5	0,0	0,1
M_y [N · m]	-124,7	373,5	-470,5	-20,6	-3,7	-3,5
Après la phase de mise en vol						
F_x [N]	70,7	27,9	34,7	0,1	4,2	3,8
F_z [N]	783,5	365,1	416,5	1,9	0,0	0,0
M_y [N · m]	-108,1	361,8	-463,9	-0,3	-3,0	-2,7

Tab. 3.12 – Valeurs convergées des forces de traînée et portance et moment de tangage obtenus à l'issue des phases d'accélération du catamaran et de mise en vol.



(a) Après la phase d'accélération



(b) Après la mise en vol

Fig. 3.16 – Vue du champ de vagues autour du catamaran

3.3 Résultats du simulateur

Afin de pouvoir rapidement évaluer à la fois différentes solutions techniques dans la conception de l'ASV, mais aussi les différentes stratégie de guidage, un simulateur simplifié a été développé sous matlab . Dans ce simulateur, les différents éléments de l'ASV (coques, foils, ailes, moteurs, ... Fig. 5.1) ont été modélisés par une collection de solides rigides en interaction Fig. 3.17. Et contrairement aux simulations 3D réalisées par M. Y. Robert avec le code Fine marine ici la portance et la trainée des différents éléments, à la fois dans l'eau et dans l'air, qui sont des paramètres essentiels de la simulation, sont approchées à l'aide d'abaques fournies par Xfoil. Différents profils de voiles et de foils peuvent être ainsi facilement choisis. Cette approche permet de tester rapidement de façon réaliste différents profils. Cet outil permet de pré-dimensionner les surfaces portantes. Une description plus détaillée de ce simulateur est faite dans le paragraphe 5.1.1.

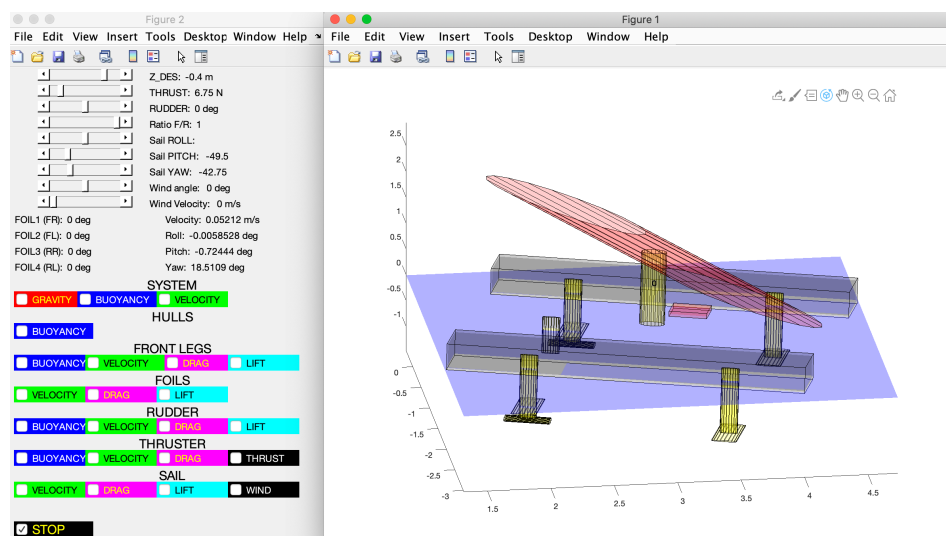


Fig. 3.17 – Simulation de l'ASV

Le guidage de l'angle des foils a été programmé pour permettre à la fois une élévation souhaitée de l'ASV au dessus du niveau de la mer, mais aussi afin de réaliser les changements de cap qu'il est possible de demander. La commande qui réalise le couplage entre les différents paramètres est décrite dans le paragraphe 5.1.3.

Lors d'une simulation, il est possible de faire varier différents paramètres en temps réel (voir figure 3.17) :

- hauteur souhaitée de l'ASV au dessus du niveau de la mer ;
- puissance délivrée par les moteurs ;
- cap souhaité de l'ASV ;
- angle et vitesse du vent ;
- angles de la voile.

Il est possible de faire apparaître les différentes forces entrant en jeux lors de la simulation, en cliquant dans les cases correspondantes qui sont sur la partie gauche de la figure 3.17. A la fin de la simulation, un bilan est produit, indiquant l'adéquation entre le comportement de l'ASV obtenu par rapport à celui qui était souhaité (trajectoire et vitesse de l'ASV, hauteur des coques par rapport au niveau de la mer) Fig. C.2.

A l'heure actuelle, la gestion de l'énergie nécessaire aux moteurs (panneaux solaires) n'est pas encore implémentée dans le simulateur. De plus, le calcul de la trajectoire globale à suivre afin d'atteindre un objectif déterminé en fonction des conditions locales n'a pas encore été mis en œuvre. Les travaux menés en parallèle des développements logiciels proprement dits du simulateur sur la détermination de la fonction objectif pour obtenir le chemin optimal sont développés dans la section 5.1.4.

3.4 Conceptions mécanique

La conception des deux prototypes (le catamarans à foils asservis et le démonstrateur de l'aile robotisée) a en partie été faite lors des stages de fin d'études de M. L. Wamytan en 2020 et M. M. Boufatah en 2021. Les modèles C.A.O. de l'aile supérieure, des foils et de la plate-forme se sont appuyés sur les simulations numériques faites par M. Y Robert qui nous permis de choisir les profils aérodynamique et hydrodynamique. Le profil H105 a été choisi pour les foils, le profil NACA4418 a été choisi pour l'aile et le profil ClarkY a été chois pour le pont, Fig. 3.18.

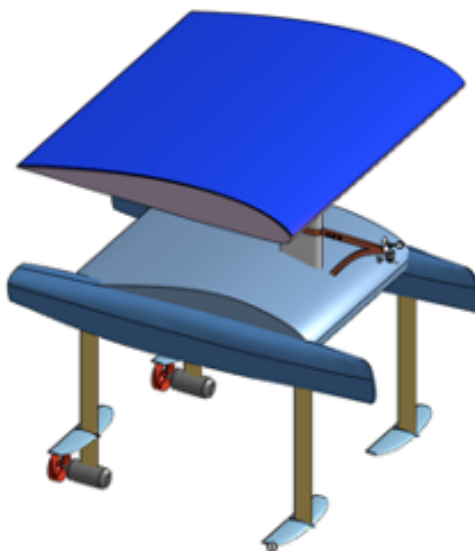


Fig. 3.18 – Modèle CAO de l'ASV-Mobula

3.4.1 Design de l'aile robotisée

L'aile supérieure sur l'ASV-Mobula est un plan rigide qui se rapproche des ailes de kitesurf de par sa forme et son contrôle Fig. 3.19. Cette aile est pilotée à l'aide de winchs électriques et des poulies. Le pilotage de l'aile sera testé sur la plate-forme de test de l'aile qui est actuellement en cours de finalisation Fig. 3.19. Le but de cette plate-forme de test est démontrer la faisabilité du pilotage de l'aile supérieure en lien avec la fonction d'optimisation qui gère par exemple entre. Cette plate-forme sera équipée d'une aile rigide équipée de panneaux solaire, d'un anémomètre fixé à l'avant, de quatre winchs électriques et de quatre poulies. Les câbles actionnés via les poulies et les winchs permettront d'orienter l'aile en fonction de son utilisation optimale. L'ail pourra être orientée de façon à favoriser le rechargement des batteries ou la propulsion vélique et le rechargement via les moteurs. Ce choix sera opéré en utilisant la fonction d'optimisation développé dans la section 5.

La phase de finalisation des prototypes doit se terminer en juillet 2021.

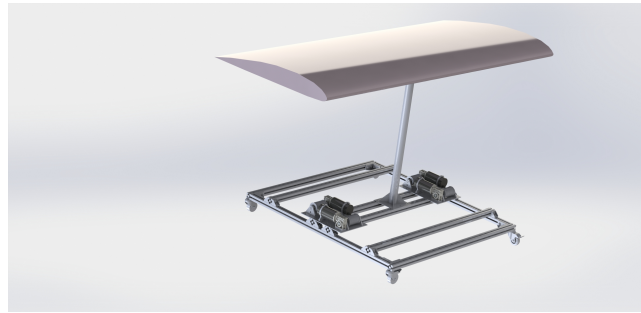


Fig. 3.19 – Modèle CAO du P.O.C. de l’aile robotisée

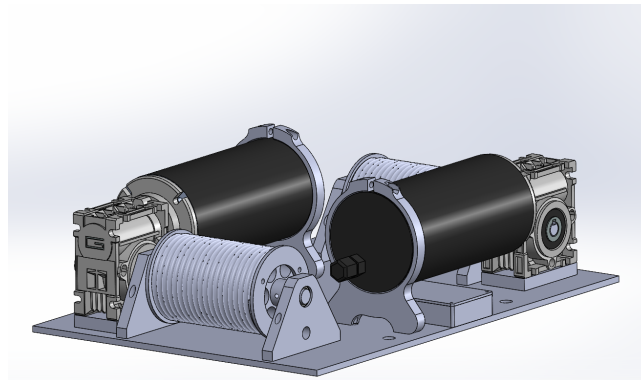


Fig. 3.20 – Modèle CAO des treuilles

3.4.2 Design de la plateforme à 4 foils

Le design de la plateforme supportant les quatre ensembles Jambe/foil peut être décomposé en une partie sur la recherche de solution technologique pour assurer les fonctions associées à chacun des systèmes mécaniques et en une partie intégration des différents systèmes.

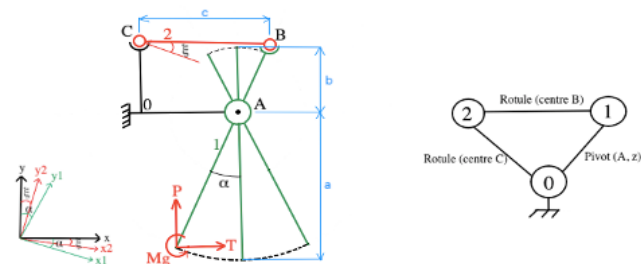


Fig. 3.21 – Schéma de fonctionnement de principe de l'actionnement des foils

3.4.2.1 les solutions technologiques pour l'articulation des foils

Le schéma de principe de l'actionnement des jambes qui a été retenu est donné dans Fig. 3.21. D'autres solutions ont été étudiées notamment le guidage cinématique de la tête de la jambe de foil. Bien que plus difficile à mettre en place technologiquement cette solution offre l'intérêt de placer le centre instantané de rotation au niveau du foil et non pas au niveau de la liaison pivot comme c'est le cas actuellement.

Dans un premier temps une solution d'entraînement de la jambe par engrenage associée à une



Fig. 3.22 – Plateforme en date du 30 septembre 2020

construction de type composite pour les jambes et les foils a été mise en place pour articuler et construire les foils. Les structures composites sont de type sandwich dont l'âme a été réalisée par la plateforme technologique de fabrication Additive Pro3D de l'Université de Montpellier Fig. 3.22.

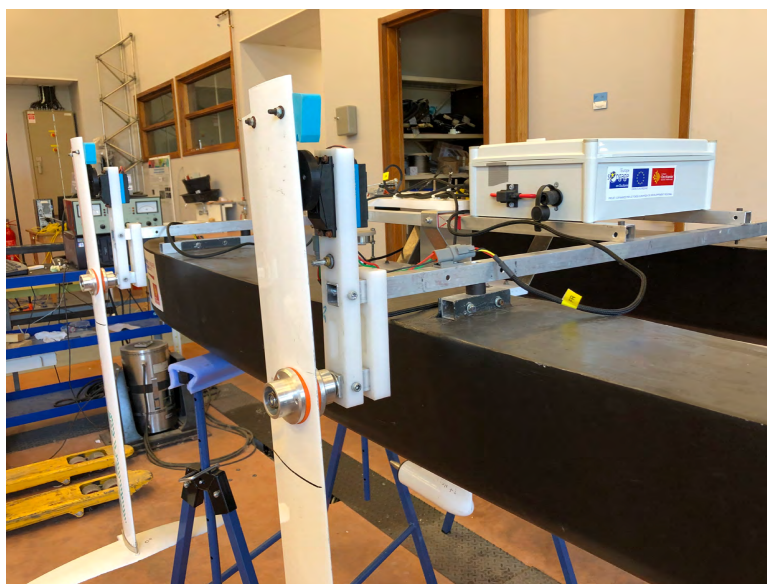


Fig. 3.23 – Plateforme en date du 30 Avril 2021

Une première amélioration a été apportée au prototype en remplaçant les jambes et les foils en composite par des solutions en aluminium et fibre de verre Fig. 3.23. Les premiers essais de cette nouvelle plateforme ont mis évidence le manque de fiabilité de la solution d'entraînement de la jambe de foil par engrenage. Aussi comme initialement prévu et dans l'objectif de la réalisation d'un engin robuste, la solution utilisant des vérins électriques est actuellement déployée par M. M. Boufatah. Une vue 3D du modèle en phase d'assemblage est présentée Fig. 3.24.

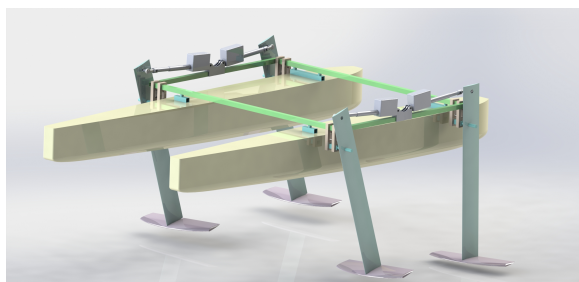


Fig. 3.24 – Modélisation de la Plateforme prévue pour Juillet 2021

4 - LOT3 : Énergie embarquée et propulsion

4.1 Propulsion électrique

Motivations fonctionnement à très basse tension : - la sécurité : la tension continue maximale admissible, qui ne nécessite pas de précautions particulières en cas d'intervention, d'après le code du travail français, est fixée à 120 V, les normes relatives aux véhicules électriques sont généralement plus restrictives et ramènent souvent cette tension à 60 V, tandis que la directive Européenne « basse tension », fixe cette limite à 75 V. Compte tenu des puissances mises en œuvre, entre 1 et 2 kW, il est envisagé d'alimenter la totalité du système ASV, motorisation principale comprise, sous une tension de batterie de 24 V.

- la disponibilité des électroniques d'alimentation : dans cette gamme de tension il existe un choix considérable de contrôleurs d'alimentation disponibles « sur étagère » (électronique de puissance nécessaire pour faire fonctionner un moteur synchrone), Malgré cela, afin d'optimiser le rendement de l'association convertisseur machine, nous avons fait le choix d'étudier aussi une solution d'électronique de puissance spécifiquement adaptée au type de motorisation très basse tension que nous choisissons de mettre en œuvre.

Choix du type de motorisation : vers l'usage d'une structure originale de moteur. Le bobinage de la quasi-totalité des machines électriques est réalisé à partir de fils de cuivre ronds isolés par émaillage, comme il apparaît sur la figure 1, le volume alloué au cuivre est alors rempli au mieux à 40%, pour des raisons de géométrie évidente, voire 30 % pour les petites encoches des machines fonctionnant à haute fréquence.

En très basse tension les conducteurs d'une encoche sont en parallèle, et sont donc assimilables à un conducteur unique, il est donc judicieux de les remplacer par un conducteur massif, le remplissage de l'encoche peut alors être voisin de 90%, ce qui a pour conséquence d'augmenter le volume de cuivre dans l'encoche d'un facteur 3.

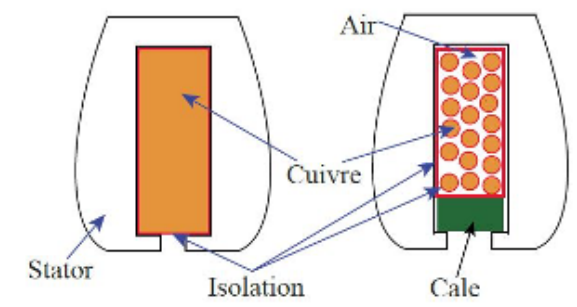


Fig. 4.1 – Bobinage à barre massive(à gauche) versus bobinage à fils (à droite)

La fFig. 4.2 illustre la façon de faire le bobinage à barres massives (conducteur d'encoche unique).

Seul le bobinage est représenté, les barres de cuivre, rondes, qui vont constituer ce bobinage, sont insérées dans des encoches de même forme au sein du circuit magnétique, comme il apparaît sur la Fig. 4.3. Les têtes de bobine, à l'extérieur du circuit magnétique, nécessaires pour relier entre eux les différents conducteurs d'une même phase, sont réalisées à l'aide de petits ponts percés au diamètre des tiges de cuivre, et disposés dans plusieurs plans dans le prolongement de la machine Fig. 4.3. Cette structuration permet d'optimiser la géométrie, de minimiser le volume de cuivre inactif (au sens de la production d'un effort moteur).

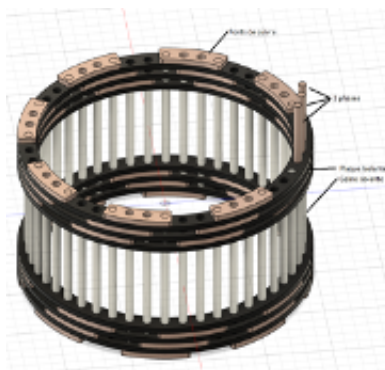
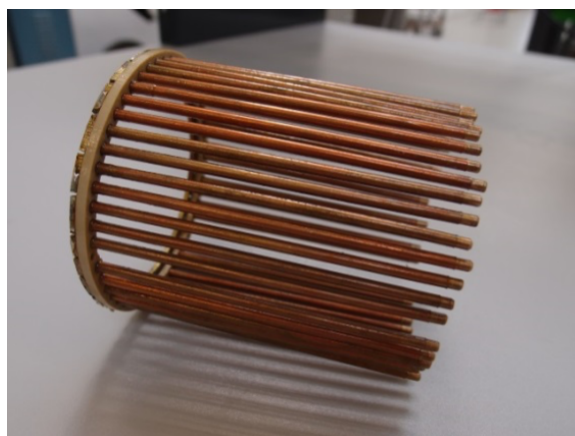


Fig. 4.2 – Bobinage à un seul conducteur par encoche



(a) Bobinage terminé



(b) Bobinage avant encapsulage

Fig. 4.3 – Réalisation pratique du bobinage à barres à cylindres

Un premier prototype de moyenne puissance, 4,5 kW, a été réalisé pour valider le concept, la figure Fig. 4.3a montre le stator terminé avec les différentes connexions de tête de bobinage. Nous ne détaillerons pas dans ce rapport les éléments de dimensionnements des prototypes, en particulier le calcul des pertes supplémentaires dans les barres de cuivre massives, qui est régi par des phénomènes complexes. La Fig. 4.4 montre le prototype assemblé, l'architecture du moteur est conventionnelle, en particulier l'étanchéification des parties électriques est assurée par un joint dynamique de sortie d'arbre. Cette solution pénalise toutefois le rendement et nuit à la compacité de la machine.

La courbe de rendement Fig. ?? du moteur de 4,5 kW montre que le rendement, supérieur à 90%, n'a pas été sacrifié au profit de la compacité du moteur.

Le moteur fonctionne parfaitement lorsqu'il est alimenté par un onduleur du commerce, mais dans le but d'optimiser l'association convertisseur-machine, d'obtenir le meilleur rendement de fonctionnement, nous avons choisi de faire développer un convertisseur spécifique par la société Vedmak

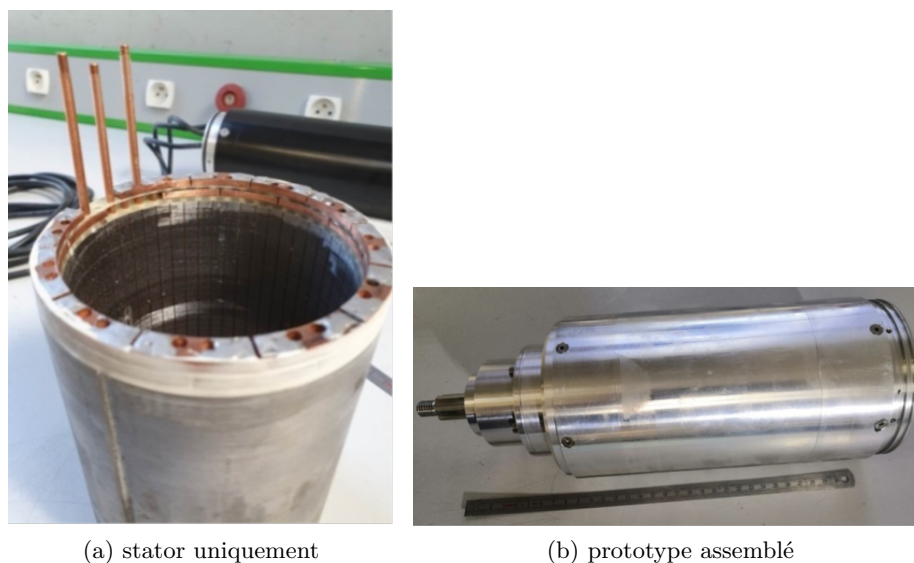


Fig. 4.4 – Prototype 4,5 kW

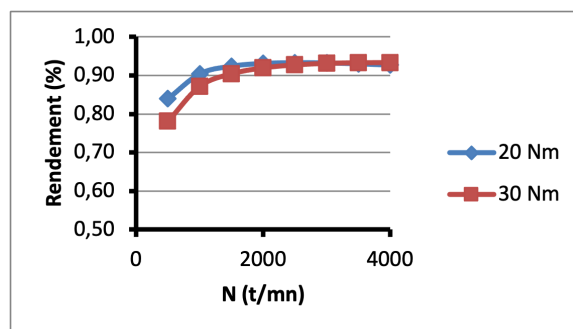


Fig. 4.5 – Courbe de rendement du moteur 4,5 kW

Dynamics. Cette petite société française ayant accepté de faire évoluer ses produits pour en adapter les caractéristiques aux moteurs étudiés Fig. 4.5.

La seconde étape de réalisation des moteurs de propulsion a consisté à étudier une structure de type turbine exploitant le concept du bobinage à barres décrit précédemment. Pour améliorer la compacité du moteur et favoriser l'efficacité de l'hélice, nous avons choisi d'intégrer les pales directement au sein du rotor, comme il apparaît sur la figure suivante. Les aimants du rotor sont collés sur une virole entourant l'hélice. Le moteur, contrairement au précédent, n'est pas étanche, l'eau pourra entrer dans la structure, le rotor et le stator étant encapsulés dans une résine pour les protéger de la corrosion. Cette disposition permet de s'affranchir du joint dynamique de sortie d'arbre, préjudiciable à la compacité du moteur et source de pertes mécaniques.

Deux verrous technologiques sont étudiés :

- les revêtements anticorrosion des deux pièces principales, le rotor et le stator, déposés en couche mince. Ils devront résister à l'usure, aux agressions marines,
- les paliers de guidage en rotation, résistants à la corrosion, à l'usure. Ils intègrent une butée axiale dynamique nécessaire pour contrer l'effort de poussée de l'hélice.

Une première maquette de validation Fig. 4.8 a été réalisée afin de valider la faisabilité du moteur turbine. Une étude d'optimisation des pales du rotor-turbine est en cours.

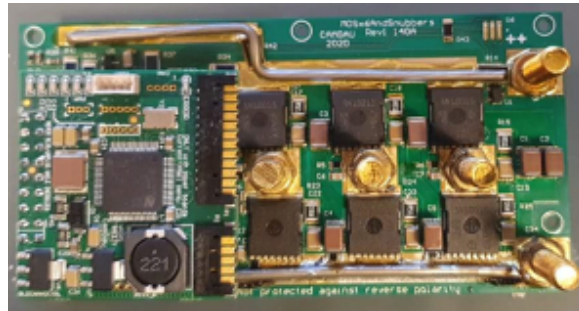


Fig. 4.6 – Contrôleur d'alimentation adapté aux moteurs développés.

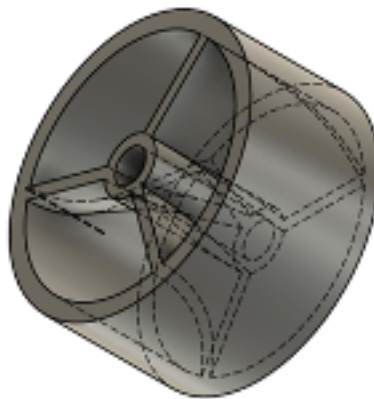


Fig. 4.7 – Dessin Rotor turbine

4.2 Génération d'énergie photovoltaïque

Un véhicule autonome de surface peut être considéré comme un système énergétique isolé car il n'est pas raccordé au réseau de distribution. L'utilisation de sources d'énergie renouvelable est quasiment inévitable pour ces systèmes car elles sont écologiques par nature, facilement disponible et ont un coût opérationnel relativement faible. L'énergie solaire et la plus commune est la plus utilisée de ces sources. Les cellules photovoltaïques convertissent l'énergie du soleil en électricité qui pourra être utilisée à bord du véhicule à des fins de propulsion ou d'alimentation des systèmes de bord. Cependant, l'énergie solaire n'est disponible que durant la journée et son intensité est affectée par les conditions environnementales telles que le passage des nuages, la température, la présence ou non de poussière dans le milieu. Les systèmes photovoltaïques destinés à des applications de petite ou de faible puissance présentent généralement une capacité de puissance relativement élevée à un niveau d'irradiation élevé et une capacité de puissance très faible à un niveau d'irradiation faible. Pour pallier cet inconvénient, en maintenant un coût raisonnable, un élément de stockage est utilisé pour récupérer l'énergie solaire lorsqu'elle est disponible en quantité excessive. L'énergie stockée est utilisée lorsque l'énergie solaire n'est pas suffisante pour alimenter la charge. La configuration la plus populaire dans les systèmes photovoltaïques autonomes associe un convertisseur de puissance et une source d'énergie auxiliaire sous forme de batterie. Dans un tel système, le générateur photovoltaïque agit comme source d'énergie primaire tandis que la batterie agit comme source de secours dès que l'énergie solaire disponible est utilisée pour alimenter la charge, si l'énergie solaire disponible en excès ou en cas de faible charge, l'énergie excédentaire est stockée dans la batterie. Durant les périodes pendant lesquelles l'énergie solaire disponible est inférieure à la demande de la charge l'énergie manquante est fournie par la batterie. Le système étend autonome, il peut se trouver dans une zone parfois



Fig. 4.8 – Maquette Rotor turbine

difficile à atteindre pour faire de la maintenance, il est donc nécessaire de disposer d'un système de conversion de l'énergie efficace et fiable. Dans le cadre du projet ASV, une plate-forme de test servant à démontrer la faisabilité du système sera équipée d'une aile rigide sur laquelle seront montés des panneaux solaires souple marinisés (souples, étanches et résistants aux UV des câbles actionnés via des poulies et des winchs permettront d'orienter l'aile pour l'utiliser de manière optimale. L'aile pourra ainsi être orientée de façon à privilégier le rechargement des batteries ou la propulsion vélique dans un premier temps et le rechargement via les moteurs dans un second temps. Ce choix sera opéré en utilisant une fonction d'optimisation située dans l'ordinateur de bord. La surface de la plate-forme de démonstration sera de 2200mm x 1100mm environ, ce qui permettra de placer environ quatre panneaux solaires d'une puissance de 100 W pour un total de 400 W sur l'aile. Il est également envisageable de placer des panneaux sous l'aile afin de récupérer le rayonnement réverbéré par la surface de l'eau ou éventuellement d'en mettre sur le pont du véhicule afin d'augmenter la puissance photovoltaïque disponible à bord. Ces panneaux ont généralement une épaisseur de trois à 4 mm pour un poids de 1,5 à 2 kg. La puissance des moteurs de propulsion sera de l'ordre de 500 W par moteur soit 1 kW au total. La tension de fonctionnement des onduleurs alimentant les moteurs de propulsion peut aller de 24 à 48 V. En raison de la surface disponible et de la puissance photovoltaïque instable il est donc évident que le générateur photovoltaïque ne peut assurer seule la fonction de propulsion et devra être suppléé par la batterie surtout s'il est nécessaire d'alimenter les moteurs lors d'épisodes de mauvais temps et à plus forte raison la nuit. Il existe plusieurs solutions pour résoudre ce problème. La plus simple consiste à utiliser un générateur photovoltaïque un convertisseur servant à extraire le maximum d'énergie des panneaux solaires et à charger la batterie et une batterie de type lithium ion afin de minimiser la masse embarquée. Une autre solution consiste à équiper le générateur photovoltaïque d'un convertisseur de puissance servant à l'exploiter au maximum de ses performances grâce à un système de poursuite de point de puissance maximale, la batterie d'un convertisseur bidirectionnel en courant contrôlant sa charge sa décharge et enfin un convertisseur continu-continu bidirectionnel en courant qui interface les onduleurs de propulsion au bus commun de distribution auquel sont connectés tous ces convertisseurs. Une dernière solution consiste à développer un composant magnétique spécial permettant d'interfacer

tous ces convertisseurs entre eux et servant d'échangeur, cette solution a également été investiguée en simulation.

4.2.1 Organisation du générateur photovoltaïque

En raison de la place disponible et de la disponibilité sur le marché nous avons choisi des panneaux fabriqués par Sunpower et de référence SPR-E-FLEX-100, qui sont des panneaux solaires adaptés à un usage en milieu marin et pouvant tolérer une flexion de 30° car si la plate-forme de test est pour le moment plane l'aile définitive sera légèrement courbe. Pour leur fixation mécanique ces panneaux peuvent être fixés avec une colle adhésive ou vissés. Leurs caractéristiques électriques et mécaniques sont données sur la figure Fig. 4.9.



(a) Photo

Typical Electrical Data at STC: 25°C, 1000 W/m ² and AM 1.5		
Model	SPR-E-Flex-110	SPR-E-Flex-100
Nominal Power (P _{nom})	110 W	100 W
Power Tolerance	+6/-3%	+6/-3%
Rated Voltage (V _{mpp})	18.8 V	17.1 V
Rated Current (I _{mpp})	5.9 A	5.9 A
Open-circuit voltage (V _{oc})	22.8 V	21.4 V
Short-circuit current (I _{sc})	6.3 A	6.3 A
Power Temp Coefficient	-0.35%/°C	
Voltage Temp Coefficient	-58.9 mV/°C	
Current Temp Coefficient	2.6 mA/°C	
Max. System Voltage	1000 V DC IEC, 600 V DC UL	
Series Fuse Rating	15 A	

(b) Caractéristiques

Fig. 4.9 – Le Panneau solaire choisi

Huit de ces panneaux ont été achetés, quatre seront disposés sur le dessus de l'aile et lorsque le démonstrateur sera suffisamment avancé nous expérimentons la pose de panneaux sous l'aile afin d'évaluer la quantité d'énergie récupérable par réverbération sur la surface de l'eau. Différentes organisations du générateur sont possibles :

- Quatre panneaux en série
- Quatre panneaux en parallèle
- Deux panneaux en série et deux en parallèle

La figure deux montre les différentes organisations possibles.

Lorsqu'une diode de bypass est associée en parallèle avec un panneau cela permet d'éviter les effets de hotspots si l'un des panneaux est affecté par un ombrage ou opacifié par un dépôt de sel ou une déjection d'oiseaux et évite de perdre une quantité significative d'énergie sur le générateur. La présence d'une diode de by-pass en série dans une branche permet d'éviter que celle-ci devienne une charge pour les autres si elle est affectée par un phénomène d'ombrage et donc elles se mettent à dissiper de la puissance et soit endommagée définitivement.

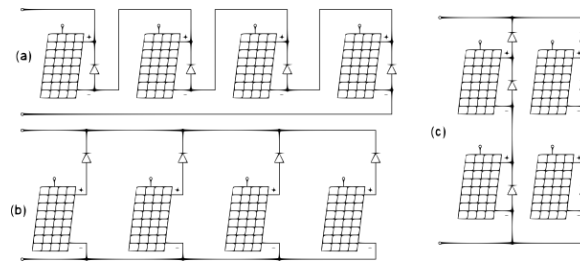


Fig. 4.10 – organisations possibles du générateur avec 4 panneaux. (a) association en série, (b) association en parallèle, et de (c) association série-parallèle

4.2.1.1 Caractérisation des panneaux photovoltaïques

Afin de vérifier les caractéristiques données par le fabricant et pour pouvoir dimensionner le reste du système, les panneaux solaires achetés ont été caractérisés grâce à une méthode utilisée à l'IES pour s'affranchir des effets environnementaux et des variations d'éclairage. Cette méthode (Fig. 4.11) permet d'obtenir la caractéristique $I(V)$ du panneau solaire en quelques millisecondes. L'ensoleillement a été mesuré à l'aide d'un pyranomètre situé sur le toit du bâtiment où se sont déroulés les essais.

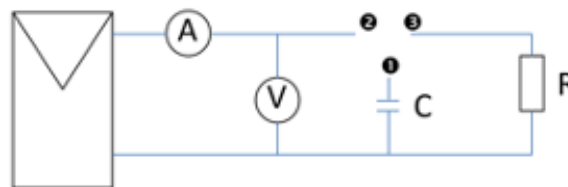


Fig. 4.11 – Schéma de la méthode de mesure des caractéristiques des panneaux solaires

Pour mesurer IPV et VPV x 1 et 2 sont connectés ensemble. Le condensateur est déchargé avant toutes nouvelle mesure en connectant 1 et 3. IPV et VPV sont relevés à l'oscilloscope en mode monocoup et enregistrés sur disque. $I(V)$ est obtenue en retraçant I en fonction de V avec un tableur.

La figure Fig. 4.12 montre le résultat d'une mesure faite à un ensoleillement de 850 W/m^2 et une température de l'air ambiant d'environ 25°C . Il est alors aisé d'obtenir la caractéristique $I(V)$ à partir de ces courbes en utilisant un tableur puis de calculer la caractéristique $P(V)$ permettant d'obtenir la localisation du point de puissance maximale. La figure 5 montre les caractéristiques obtenues pour deux inclinaisons différentes du panneau par rapport à l'horizontale (ici le sol).

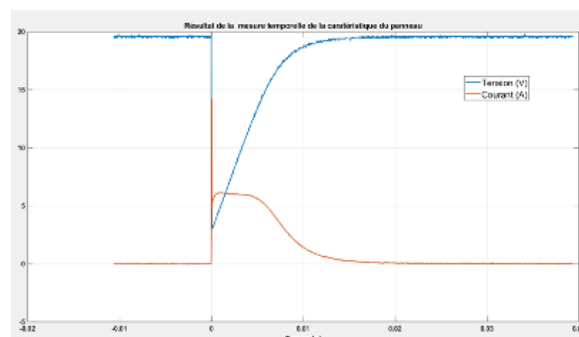


Fig. 4.12 – Courbes temporelles obtenues pour un ensoleillement de 850 W/m^2

4.2.1.2 Les effets de l'angle d'inclinaison sur la puissance disponible

La figure Fig. 4.13 met en évidence que l'angle que forme le panneau avec l'horizontale et conséquemment l'angle entre la normale à la surface du panneau solaire et les rayons lumineux du soleil joue un rôle important sur les caractéristiques du panneau. En effet, la quantité de lumière reçue à la surface du panneau est maximale lorsque les rayons du soleil sont parallèles à la normale à la surface du panneau. À Montpellier l'angle que doit former le panneau solaire avec le sol doit être d'environ 22° pour que cette condition soit remplie. La caractéristique P(V) de la figure Fig. 4.13 permet de déterminer le maximum de puissance disponible pour chacun des deux angles.

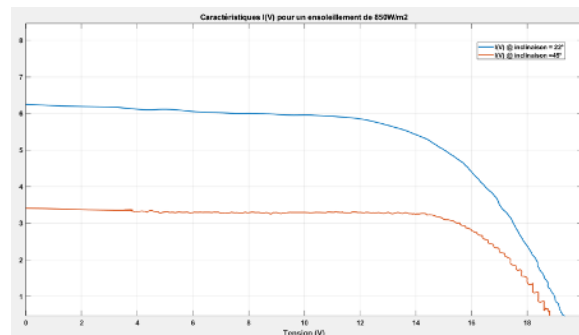


Fig. 4.13 – Influence de l'angle panneau pour un ensoleillement théorique de 850 W/m^2

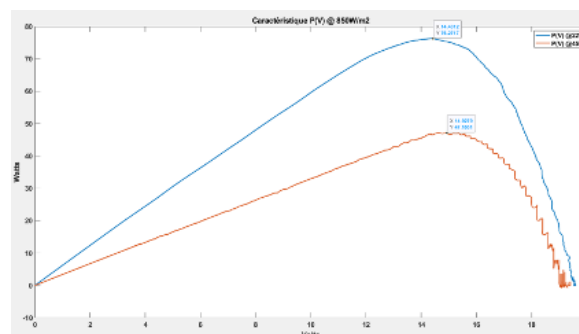


Fig. 4.14 – caractéristiques P(V) pour 850 W/m^2 et deux angles d'inclinaison différent

Une autre mesure a été faite à 980 W par mètre carré pour se rapprocher des 1000 W par mètre carré utilisés par le fabricant pour caractériser les panneaux. Les résultats sont donnés sur la figure sept

4.2.1.3 Les effets de la température sur la puissance disponible

Les courbes de la figure Fig. 4.15 montrent que le point de puissance maximale se situe aux alentours de $14,7 \text{ V}$ pour une puissance de $79,6 \text{ W}$ au lieu de 100 W et $17,1 \text{ V}$. Par ailleurs, la tension de circuit ouvert se situe aux alentours de $19,5 \text{ V}$ au lieu de $21,4 \text{ V}$ comme annoncé sur la datasheet du fabricant. Les mesures du fabricant ont été menées en laboratoire à une température de cellules de 25°C . Nos mesures ont été faites en plein soleil et malgré une température de l'air de 25°C les cellules ont une température plus élevée car elles sont chauffées par les rayons du soleil. Le delta de tension étant de $1,9 \text{ V}$ on peut en déduire grâce au coefficient de correction en tension et en température fourni par le fabricant que la température des cellules était de $25 + 1,9/0,0589 = 57,5^\circ\text{C}$ soit un delta de température par rapport à l'air ambiant de 32°C . Avec ce delta de température et les coefficients toujours fournis par le fabricant, on s'attendrait à trouver une puissance au point de

puissance maximale de 88,8 W au lieu des 79,6 effectivement mesurés. Cette erreur reste toutefois minimale et peut être imputée au calibrage des sondes de tension et de courant utilisé pour la mesure. Les caractéristiques du panneau sont donc à peu près celles espérées.

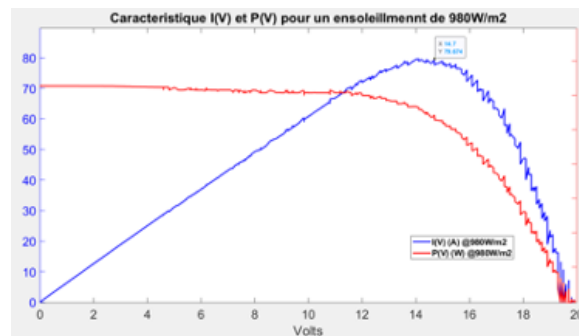


Fig. 4.15 – caractéristiques P(V) et I(V) pour 980 W/m²

4.2.1.4 Les effets de l'ensoleillement et des ombrages sur la puissance disponible

La figure Fig. 4.16 montre que l'ensoleillement a un effet important sur les caractéristiques du panneau. Pour une variation de 350 W par mètre carré à 980 W par mètre carré, la puissance maximale passe de 15,4 W à 79,6 W et dans le même temps la tension de puissance maximale se déplace de 15,5 V à 14,7 V soit 1 V de variation. Le courant de court-circuit est également très fortement influencé puisqu'il passe de 1,15 A à 6,27 A. Enfin, on note que l'ensoleillement a également un effet sur l'attention de circuit ouvert qui est tout de même bien moindre que sur le courant de court-circuit. Ces variations très importantes dans les caractéristiques des panneaux montrent qu'il est nécessaire d'utiliser un système de poursuite de point de puissance maximale.

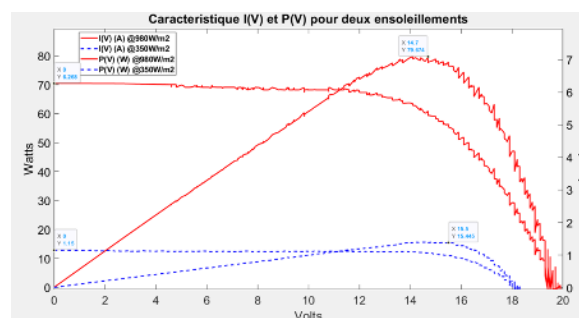


Fig. 4.16 – Effets de l'ensoleillement sur les caractéristiques

Lorsqu'une cellule est totalement ou partiellement encombrée le courant qu'elle peut générer diminue fortement. La caractéristique du panneau est alors fortement modifiée à cause de cette cellule. Si aucune mesure de protection n'est prise c'est toute la caractéristique du générateur qui est très fortement modifiée, dans les cas extrêmes l'attention aux membres de la cellule finit par s'inverser et peut même atteindre le régime d'avalanche entraînant la destruction irréversible du panneau. Les diodes de by-pass permettent de dévier le courant notamment dans le cas d'un assemblage série pour éviter que le panneau soit endommagé. La figure Fig. 4.17 montre l'influence d'un ombrage sur la caractéristique du panneau. Lorsque la cellule est totalement masquée on constate une division par deux de la puissance maximale disponible et une déformation importante de la caractéristique du panneau. Même une tâche légère sur le panneau provoque une déformation de la caractéristique sensible. La caractéristique en bleu présente un point de puissance maximale légèrement supérieure à celui de la

caractéristique en rouge probablement en raison d'une erreur probable de mesure sur l'ensoleillement due au délai d'intégration par le pyranomètre, on note néanmoins que cette caractéristique présente elle aussi une déformation. Il est difficile de repérer le vrai point de puissance maximale lorsqu'un tel défaut apparaît sans utiliser un algorithme de recherche particulièrement sophistiqué.

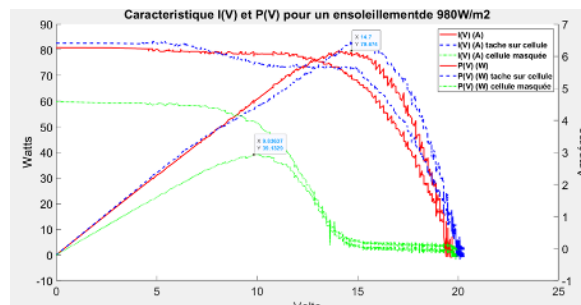


Fig. 4.17 – Effets des ombrage ou des défauts de cellules sur la caractéristique des cellules

4.2.1.5 Caractéristiques du générateur complet

Le dessus de l'aile du véhicule peut accueillir quatre panneaux solaires que l'on peut assembler de trois manières différentes selon le besoin. La figure Fig. 4.18 montre les caractéristiques que l'on peut obtenir avec un ensoleillement de 980 W par mètre carré proche des 1000 W par mètre carré que l'on devrait rencontrer en mer.

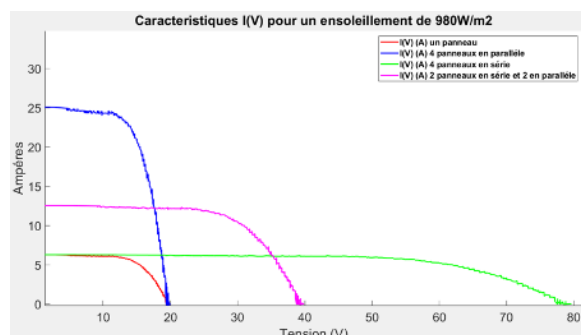


Fig. 4.18 – Assemblages série ou parallèle de panneaux

Avoir une tension élevée en sortie du générateur comme dans le cas de la courbe en vert permet de choisir une large gamme de tension de bus continu (12V, 24V, 36V, 48V) et donc d'utiliser à peu près n'importe quel régulateur de charge du commerce pour contrôler la batterie. Néanmoins, dans le cas d'une électronique conçue spécifiquement pour ce projet avoir une tension plus basse permet d'utiliser des composants semi-conducteurs avec des résistances à l'état passant relativement faible, par exemple si l'attention de bus choisi est de 24 V ou 36V il sera possible d'utiliser des composants dans la gamme 50 V à 60 V qui ont des RDS on très faibles et donc d'avoir un bon rendement pour l'étage de puissance malgré des courants plus importants. La figure Fig. 4.19 montre que finalement toutes les combinaisons conduisent à obtenir la même puissance maximale qui sera d'environ 320 W pour 980 W par mètre carré. La seule différence entre ces caractéristiques et la position de la tension de point de puissance maximale.

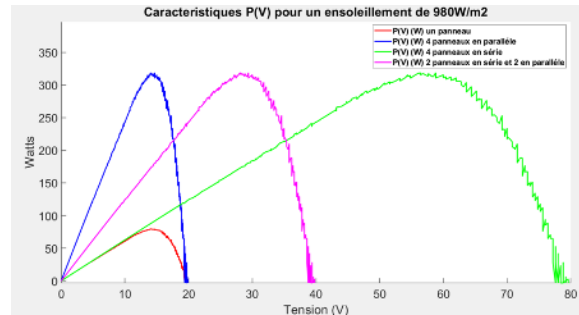


Fig. 4.19 – Comparaison entre les différents type de montages série/parallèle des panneaux

4.2.1.6 Conclusions

Les panneaux présentés dans ce paragraphe ont été achetés et testés. Il semble toutefois qu'il soit nécessaire de faire des investigations plus approfondies car les caractéristiques mesurées ne correspondent pas tout à fait aux caractéristiques données par le fabricant dans le data sheet des panneaux solaires Fig. 4.9b, quel que soit l'assemblage des panneaux la puissance obtenue au point de puissance maximale à 100 W par mètre carré atteint difficilement les 80 W. Le point de puissance maximale semble plutôt se situer aux alentours des 15V au lieu de 17,1 et l'attention de circuit ouvert est de 19,5 V au lieu de 21,4 V. Des investigations supplémentaires sont donc nécessaires car pour le moment la puissance disponible à bord ne sera que de 320 W au lieu de 400 comme espérés.

4.2.2 Architecture du système de conversion

En raison de l'extrême variabilité des paramètres influençant la quantité d'énergie disponible sur le générateur photovoltaïque, il n'est pas possible de le connecter directement aux batteries. Un système de gestion d'énergie et de conditionnement de cette énergie doit être inséré entre le générateur photovoltaïque et les batteries. La tension du pack de batteries n'étant pas forcément la même que celle des panneaux photovoltaïques ou celle nécessaire au fonctionnement de l'onduleur un convertisseur peut éventuellement être inséré entre la batterie et le bus de distribution. Enfin, il peut être nécessaire d'un convertisseur bidirectionnel en courant si l'onduleur doit renvoyer de la puissance vers la batterie.

Comme mentionné auparavant, trois solutions sont possibles de la plus simple à la plus complexe :

- Le générateur et la batterie sont interfacés au travers d'un convertisseur continu-continu qui va assurer la recharge de la batterie et la fonction de recherche puissance maximale. La recherche de point de puissance maximale va permettre de maximiser le transfert d'énergie entre les panneaux et la batterie et d'extraire tout ce qui est disponible au niveau du générateur indépendamment du niveau d'ensoleillement et de la température. Les autres sous systèmes embarqués à bord du véhicule seront connectés en parallèle sur la batterie qui imposera l'attention du bus de distribution. Ce système peut être réalisé à l'aide de composants ou de sous-ensembles déjà industrialisés, c'est l'approche qui sera utilisée pour le démonstrateur.
- Une autre solution consiste à doter chaque source de puissance de son propre convertisseur est de connecter ses convertisseurs entre eux sur un même bus de distribution. C'est la solution la plus flexible qui permet de régler l'attention du bus de distribution indépendamment de la tension propre à chaque source. Sa mise en œuvre est plus complexe car la commande de chacun des convertisseurs doit être adaptée à la nature de la source. Les convertisseurs électroniques de puissance sont relativement simples à réaliser mais leur commande doit être particulièrement soignée.
- La dernière solution consiste à connecter les sources entre elles au travers d'onduleur échangeant de la puissance via un composant magnétique spécifique qui permettra d'aiguiller l'énergie entre

les convertisseurs en agissant sur le déphasage de leur commande. C'est une solution complexe, difficile à réaliser car le composant magnétique permettant l'échange entre les sous-systèmes doit être créé de toutes pièces car il n'existe pas industriellement.

Ces trois solutions ont été explorées et simulées, les résultats sont présentés dans la suite.

4.2.2.1 batterie connectée directement au bus de distribution

Dans ce système, dont le schéma est donné ci-dessous (Fig. 4.20), un convertisseur continu-continu abaisseur est placé entre le générateur photovoltaïque et la batterie. Il assure la recherche de point de puissance maximale et la charge de la batterie. Il est possible de connecter plusieurs groupes de panneaux solaires et de convertisseur continu-continu en parallèle sur la batterie, cela permet d'avoir plus de flexibilité pour disposer les panneaux sur le véhicule et simplifier le câblage. Les autres systèmes viennent se connecter en parallèle sur la batterie qui impose alors l'attention du bus de distribution.

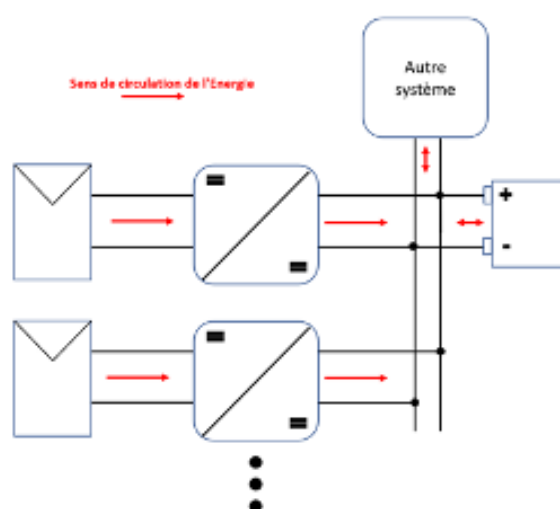


Fig. 4.20 – Organisation du système avec batterie connectée au bus continu

Chaque convertisseur continu-continu est un hacheur abaisseur ou élévateur en fonction du rapport entre la tension de batterie et la tension de point de puissance maximale des panneaux solaires. La commande de ce hacheur est assurée par une boucle de courant qui reçoit sa consigne du système de recherche de point de puissance maximale. Il existe de nombreux algorithmes de recherche de point de puissance maximale mais le plus connu est l'algorithme dit de « perturb and observe » cet algorithme simple à implémenter est assez efficace. Comme le montre la figure Fig. 4.21, une simulation Matlab-Simulink de ce système a été effectuée avec une batterie lithium-fer polymère de 24 V nominaux, le modèle utilisé pour les panneaux solaires a été modifié en fonction des mesures obtenues au paragraphe précédent.

Les caractéristiques du générateur photovoltaïque ont été recalculées pour cinq ensoleillements différents en tenant compte des mesures qui ont été effectuées sur les panneaux SunPowers qui ont été achetés. Dans cette simulation les panneaux sont assemblés en série, ce qui pour quatre panneaux place le de point de puissance maximale à 58,8 V et 317 W pour un ensoleillement de 1000 W par mètre carré. Le courant de point de puissance maximale est alors de 5,4 A comme le montre la figure Fig. 4.22

Afin de simuler le passage d'un nuage et de voir comment réagit l'algorithme de recherche de point de puissance maximale, un profil d'ensoleillement permettant de mettre ses performances à l'épreuve a été spécialement créé. Il simule une montée progressive à 1000 W par mètre carré puis une divine

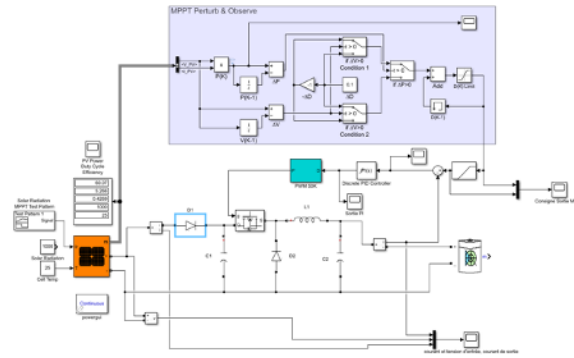


Fig. 4.21 – Schéma simulink de simulation

légère diminution de la luminosité un trou du au passage du nombre puis le retour à 1000 W par mètre carré. (figure 15).

Pour chaque valeur d'ensoleillement, l'algorithme de recherche de point de puissance maximale fournira la valeur du courant à injecter dans la batterie pour que le courant en entrée du convertisseur corresponde au courant de point de puissance maximale. Le courant dans la batterie sera imposé par la boucle de régulation de courant. La figure Fig. 4.24 montre que le résultat est bien celui attendu l'ondulation du courant de batterie n'est pas un problème du fait de la nature même de ce composant. La puissance délivrée par le générateur photovoltaïque suit fidèlement les valeurs calculées sur la figure Fig. 4.22. L'algorithme de recherche de points de puissance maximale s'accommode tout aussi bien de faibles variations d'ensoleillement que de variations de presque 100%. À chaque fois que le régime permanent est atteint le point de fonctionnement est bien celui attendu et correspond au point puissance maximale.

Ce système de contrôle et de gestion de l'énergie correspondant tout à fait aux besoins du véhicule autonome de surface et pourra s'accommoder des variations de luminosité dus aux changements d'inclinaison de l'aile sur laquelle sont montés les panneaux. Dans les systèmes commerciaux de nombreuses autres fonctions sont également fournies pour assurer une gestion optimale de la batterie et optimiser sa durée de vie. Ces systèmes industriels sont largement paramétrables et peuvent tout à fait être adaptés aux besoins de l'ASV. Parmi ces produits le chargeur solaire à recherche de point de puissance maximale fabriqué par la société Victron Energy ayant pour référence SmartSolar MPPT 150/45 semblent tout à fait convenir au besoin. Ce contrôleur/chargeur offre de nombreuses possibilités de communication, il est même possible de l'interfacer avec un microcontrôleur par une liaison série, et il est possible de paramétrer complètement son algorithme de charge de batterie pour l'adapter à un pack fait sur mesures.

4.2.2.2 Association de convertisseurs sur un bus de distribution commun.

Cette architecture dont le schéma est donné sur la figure 17 permet à des sources de nature différente, de tensions différentes, de puissances différentes d'échanger de l'énergie entre elles. Les convertisseurs continu-continus alternatifs auxquels elles sont connectées sont reliées entre eux par un bus à courant continu commun.

C'est la solution offrant la plus grande flexibilité et pour augmenter la puissance du système il suffit de connecter des sources supplémentaires sur le bus. À bord du véhicule autonome de surface il y a trois sources possibles : le générateur photovoltaïque, la batterie, les moteurs lorsque ceux-ci renvoient de l'énergie fonctionnent en hydrolenne. Un système représentatif de celui qui sera embarqué à bord du véhicule a été simulé à l'aide du logiciel de simulation d'électronique de puissance PSIM. Cette simulation inclut un générateur photovoltaïque supposé fonctionner à son de point de puissance

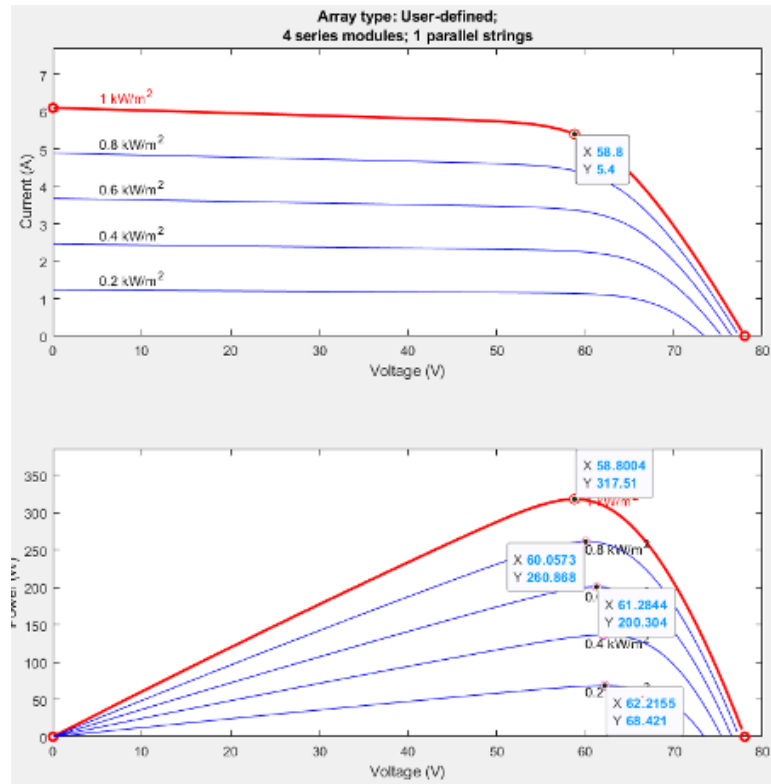


Fig. 4.22 – Caractéristiques du modèle de générateur photovoltaïque utilisé dans la simulation

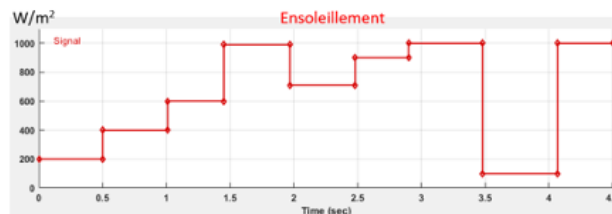


Fig. 4.23 – Profil d'ensoleillement utilisé pour la simulation

maximale et ayant les caractéristiques déterminées précédemment mais organisé en 4 panneaux parallèle ($V_{mpp} = 14.7V$, $I_{mpp}=21.6A$, $V_{oc}=19.5V$ et $I_{cc}=24.4A$), une batterie de 24 V, une charge variable représentant les différents éléments présents à bord consommant de l'énergie et un convertisseur supplémentaire pouvant fournir du courant à une source de tension symbolisant l'onduleur, dans la simulation on suppose également que cette source peut renvoyer du courant vers le bus continu. La tension de bus est cette fois fixée à 36V pour être supérieure à celles de toutes les autres sources et ainsi faciliter les transferts d'énergie.

Les convertisseurs envisagés dans la simulation sont des bras de pont qui sont par nature bi-directionnels en courant et qui lorsqu'une inductance leur est adjointe sur le point milieu peuvent fonctionner en hacheur abaisseur ou en hacheur élévateur selon le sens de circulation du courant. Le schéma de simulation est donné sur la figure Fig. 4.26, les panneaux solaires sont connectés à un hacheur élévateur, ce qui revient à utiliser un bras de pont en bloquant le transistor du haut et en pilotant celui du bas, on utilise alors la diode intrinsèque du transistor du haut, l'injection de puissance se faisant par le point milieu. Afin de faciliter la simulation, de diminuer le temps de calcul car dans ce

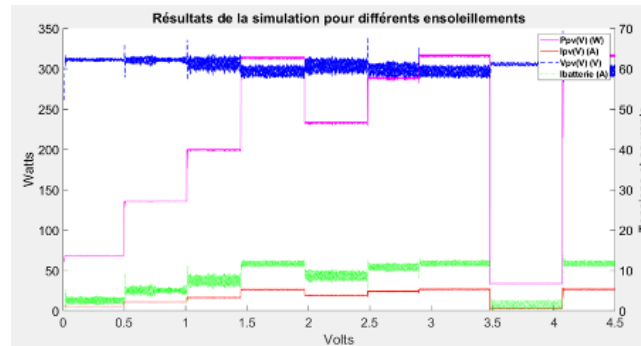


Fig. 4.24 – Résultats obtenus à partir de la simulation Simulink

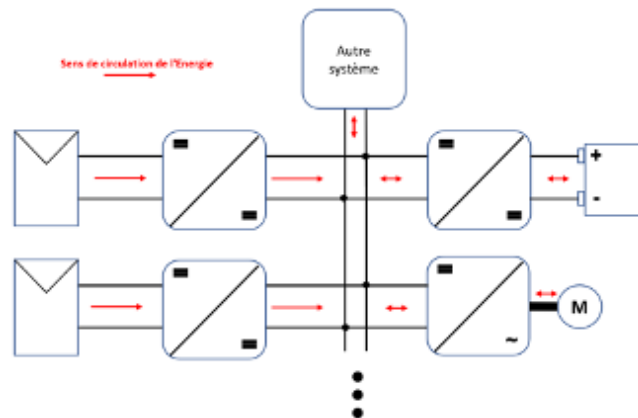


Fig. 4.25 – Schéma de convertisseurs et de sources partageant un bus commun de distribution

modèle le découpage est pris en compte et de faciliter la compréhension, il est supposé que l'algorithme de recherche de point de puissance maximale donne la bonne consigne de courant soit 21,6 A. La commande du hacheur élévateur relié au générateur photovoltaïque se fait par l'intermédiaire de deux boucles de régulation associées en cascade. La boucle externe de tension compare l'attention de bus continu à une consigne de tension, ici 36 V, et génère par l'intermédiaire d'un régulateur proportionnel intégral une référence de courant nécessaire pour atteindre cette consigne de tension. Cette consigne de courant est soustraite de la consigne de courant provenant de l'algorithme de recherche de point de puissance maximale et sert de consigne pour la boucle interne de courant qui va imposer le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque à 21,6 A et 14,7 V. Le principe est le même pour le convertisseur continu-continu connecté à la charge simulant onduleur. Le convertisseur connecté à la batterie n'a été doté que d'une simple boucle de régulation de courant. En pratique, le convertisseur connecté à l'onduleur pourrait lui aussi recevoir une simple boucle de courant et la consigne de courant proviendrait alors de l'algorithme central de gestion du véhicule, la consigne étant, avec les conventions choisies, négative lorsque le convertisseur doit absorber de l'énergie depuis le bus continu et positive lorsqu'il doit fournir de l'énergie sur le bus continu. La présence de la boucle externe de tension permet aux convertisseurs de déterminer seul le courant qu'il doit injecter sur le bus continu pour atteindre l'attention de 36 V lors des phases de récupération. Plusieurs scénarios sont possibles :

- sur la figure Fig. 4.27, une seule charge consommant une puissance de 317 W environ est connectée au bus continu. Après un court régime transitoire, l'attention de bus se stabilise à 36 V le courant quitté par le générateur photovoltaïque aux alentours de 21,6 A pour une tension en sortie du générateur d'environ 14,7 V. La puissance vue de par la charge se stabilise également très rapidement vers 317 W l'équilibre des puissances et ainsi assuré, néanmoins si la charge

demandée plus que ce que peut débiter le générateur photovoltaïque, la consigne de courant atteindra alors sa butée maximale et la consigne de 36 V ne pourra pas être atteinte.

- Dans le scénario illustré par la figure Fig. 4.28, la charge a augmenté et le générateur photovoltaïque seul ne peut plus fournir la puissance nécessaire car elle est maintenant de 860 W environ, la batterie doit donc fournir le delta de puissance et reçoit pour cela une consigne de 22,6 A positifs ce qui veut dire qu'elle doit débiter dans le bus continu. On constate sur la figure 20 que le générateur photovoltaïque débite 317 W qui correspondent à son maximum de puissance, tandis que la batterie fournit 543 W pour un total de 860 W
- Dans cet exemple, illustré figure Fig. 4.29, il est supposé que le générateur photovoltaïque fonctionne toujours à son compte puissance maximal, que la batterie est rechargée avec un courant de 5 A (consigne -5 A), et que les moteurs fonctionnent en hydrolienne ou en tout cas récupération et peuvent renvoyer de la puissance vers le bus continu. C'est donc une situation de déséquilibre dans laquelle le déficit de puissance est fourni par le convertisseur continu continu relié à l'onduleur (et donc par les moteurs). Grâce à la boucle externe de tension qui fixe l'attention de bus continu à 36 V, le convertisseur continu-continu fourni de lui-même une puissance de 666 W correspondants à ce qu'il manque pour maintenir le système en équilibre. Le bilan de puissance est donc le suivant le générateur photovoltaïque fourni 317 W la batterie absorbe 120 W les moteurs fournissent 666 W pour un total final de 860 W correspondants à ce qui est demandé par la charge connectée au bus continu sous une tension de 36 V.

Ces quelques exemples illustrent les possibilités de transfert de puissance sur le bus continu grâce à l'utilisation de convertisseur des CDC réversibles ou non en courant. Ces simulations montrent bien qu'il est possible d'obtenir un système très flexible permettant de transférer de l'énergie entre sources et entre sources et charges. Il est également possible dans un tel système d'uniformiser la conception en utilisant toujours le même convertisseur continu avec la même structure de puissance et les mêmes composants les mêmes composants, en d'autres termes, il suffit de concevoir un seul convertisseur dimensionné sur la source la plus puissante et d'adapter sa commande en fonction du type de source ou du besoin.

4.2.2.3 Brique élémentaire du système de conversion

Un convertisseur unitaire a été simulé sous Matlab simulink avec la double boucle de commande. La figure Fig. 4.30 montre le schéma de ce convertisseur élémentaire qui sera utilisé comme brique de base pour le système. L'utilisation de simulink présente un avantage certain en termes de réalisation car les schémas de commande simulink peuvent être directement traduits en code C par le Matlab coder grâce à un blockset dédié est programmé dans un microcontrôleur de type DSPIC fabriqué par Microchip.

La figure Fig. 4.31 montre des résultats de simulation sur lesquels on peut voir la tension de sortie la consigne de tension de sortie le courant de sortie du convertisseur d'abord pour une consigne de tension de 36 V et un impact de charge de 100% puis pour une consigne de tension de 24 V et également un impact de charge de 100%. Les dépassements qui apparaissent lors de brusques variations de charges sont dus aux coefficients des régulateur proportionnel intégral qui doivent être encore un peu ajustés

Ce système pourra être réalisé relativement rapidement car l'IES dispose de matériel de prototypage rapide dédié à l'électronique de puissance conçue par le groupe GEM permettant de valider rapidement des concepts. Ce matériel se compose d'un bloc de puissance (Fig. 4.32) composé lui-même de plusieurs bras onduleur et d'une carte permettant de réaliser différentes combinaisons de filtres. Une carte de commande non visible sur la photo de la figure Fig. 4.32 permet de piloter cet ensemble.

4.2.2.4 Echanges par transformateur spécial

Cette approche, toujours en cours consiste à évaluer la faisabilité d'un convertisseur de puissance dans lequel au lieu de combiner différentes sources d'entrée à courant continu sous forme électrique (par association parallèle de convertisseur) les sources à courant continu seraient combinées sous forme magnétique en additionnant les flux magnétiques produits dans le noyau d'un transformateur servant d'élément de couplage.

Dans ce convertisseur Multiport, le dimensionnement du composant magnétique qui est véritablement le cœur du convertisseur puis sa fabrication nécessitent une modélisation poussée. Ce composant doit avoir plusieurs fonctions : isoler galvaniquement les sources d'énergie assurant la sécurité électrique et réaliser le filtre d'interconnexion de celles-ci.

Ce composant n'existant pas dans les catalogues des fabricants de composants magnétiques sa fabrication se fait nécessairement par assemblage de composants standards qui doivent être retailés pour ce besoins grâce à la plateforme technologique 3DPHI située à Toulouse. La pandémie de Covid 19 et les restrictions d'accès aux laboratoires n'ont pour le moment pas permis de reprendre la fabrication du composant. Ce concept étend de toute façon l'état de l'art il ne pourra pas être finalisé dans les délais impartis par le projet Mobula mais reste quelque chose de très prometteur pour les systèmes d'énergie embarquée. Le schéma synoptique du convertisseur tel que simulé est donné sur la figure Fig. 4.33 . La simulation simulink a permis de montrer la faisabilité d'un tel convertisseur est de mettre au point une stratégie de commande adaptée. En effet, c'est en jouant sur l'angle de calage des commandes des convertisseurs que l'on arrive à transférer de la puissance d'un convertisseur à l'autre.

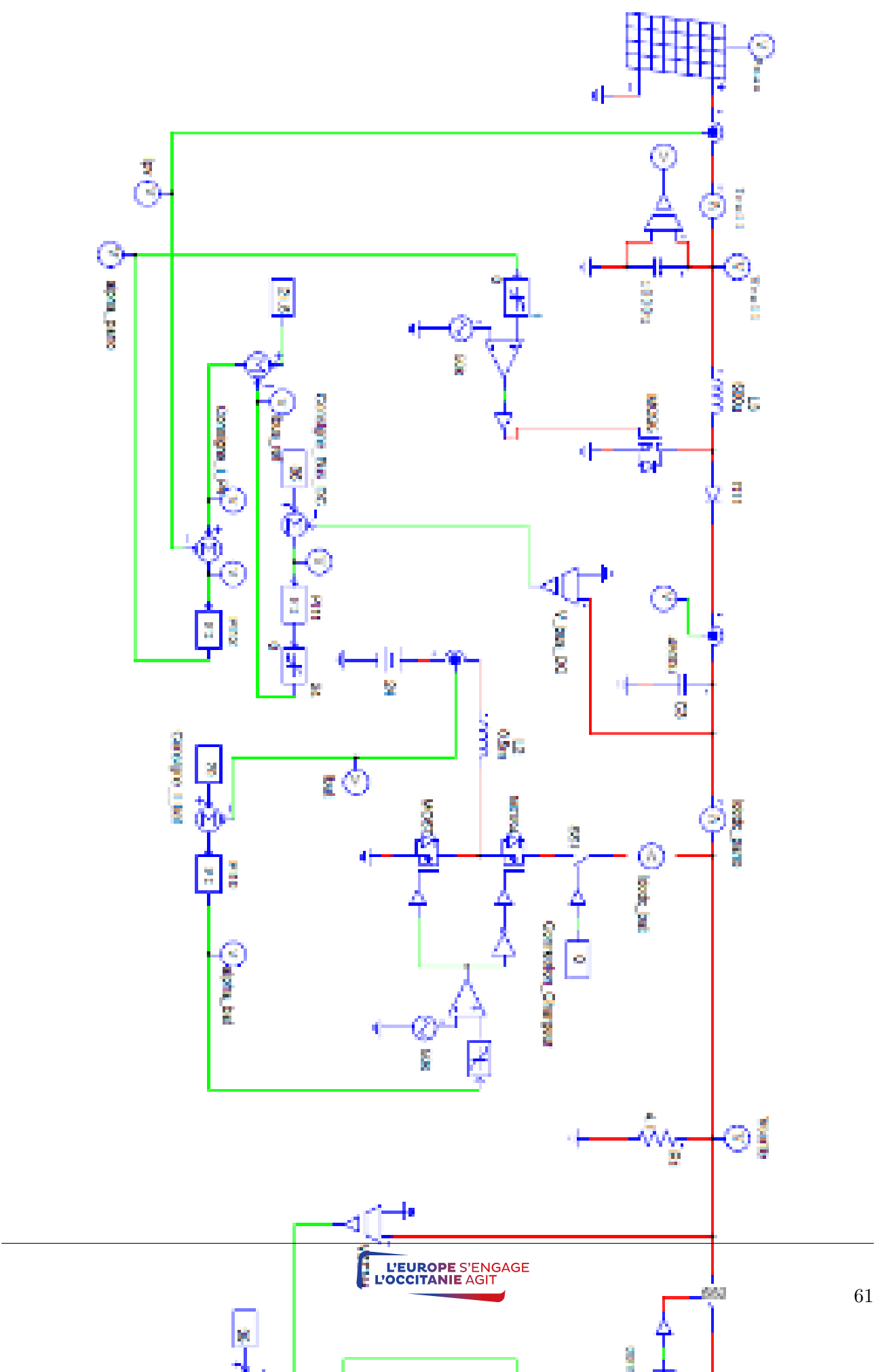
Le composant magnétique a lui été simulé à l'aide d'un logiciel de calcul électromagnétique en éléments finis (Comsol multi physique) afin de valider le dimensionnement magnétique de ce composant est d'évaluer l'impact des découpes de matériaux magnétiques sur la répartition des flux dans composant, les résultats de simulation de la figure Fig. 4.35 montre qu'il est possible de faire passer une puissance différente dans chacune des jambes du transformateur sans saturer le noyau magnétique. Toutefois, comme le montre la simulation il reste des zones où la densité de champ est relativement importante ce qui va nécessiter de considérer des fréquences plus élevées que celles que nous avons utilisées dans nos simulations et calculs.

4.2.2.5 conclusion

Dans ce paragraphe, plusieurs systèmes ont été proposés pour interfacer des sources de nature fondamentalement différente entre elles. La simulation a montré que dans tous les cas exposés cela été faisable avec un degré de complexité plus ou moins grand. La solution la plus simple et la plus facilement réalisable consiste à associer le générateur photovoltaïque avec un convertisseur continu continu assurant la recherche de point de puissance maximale et la recharge de la batterie qui est connectée directement un bus de distribution continue sur lequel viennent se greffer les autres éléments du véhicule. Cette solution qui peut être rapidement mise en œuvre sera implantée sur le démonstrateur le réalisée par le LMGC. Victron ayant rendu son protocole de communication open source, un système de monitoring permettant de surveiller le flux de puissance sera implémenté sur un système à microcontrôleur dans les prochaines semaines pour pouvoir interfacer le gestionnaire d'énergie avec le système d'optimisation embarqué. Le second système fait également l'objet d'une expérimentation, la brique élémentaire présentée au paragraphe 3.4 est actuellement en cours de réalisation et permettra de faire transiter le courant dans les deux sens vers la source qui lui sera connectée si celle-ci est bien entendue réversible. Le choix et l'ordre de mise en route de tel ou tel convertisseur sera donné par l'électronique de commande globale et la fonction d'optimisation embarquée à bord du véhicule.

4.2.3 Conclusion production d'énergie

Au terme de ce rapport, l'architecture générale du système de puissance embarquée se dessine plus précisément. Deux solutions sont à l'étude, la première constituée d'un générateur avec quatre panneaux en série associant un régulateur de charge fabriqué par Victron et monitorer par un système de contrôle fabriqué à l'IES qui permettra de délivrer des informations à l'électronique chargée d'exécuter la fonction d'optimisation embarquée. La seconde solution consiste à utiliser un générateur composé de quatre panneaux associés en parallèle coupler un système plus complexe mais offrant une flexibilité plus grande dans l'interfaçage des sources et la gestion des transis d'énergie. Le premier système est quasiment achevé, la commande du contrôleur d'énergie avec système de poursuite de point de puissance maximale sera effectuée dans les prochains jours et l'ensemble sera fixé sur l'aile de démonstration lorsque la partie mécanique sera achevée. L'élément de base du second système est en cours de fabrication un prototype de validation de la brique élémentaire est quasiment achevé. Si les tests se révèlent concluants un PCB spécifique sera réalisé dans les semaines à venir. Plusieurs convertisseurs seront alors réalisés et permettront de faire des essais en situation réelle sur le prototype de l'aile.



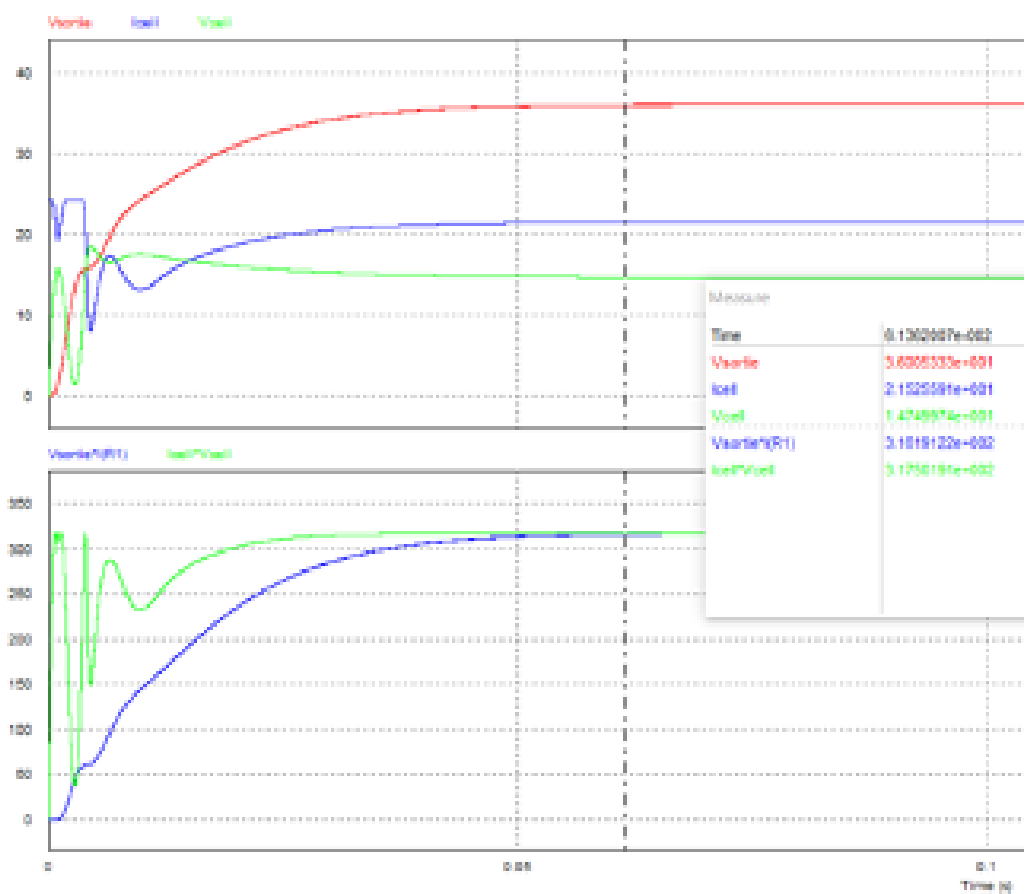


Fig. 4.27 – Seul le générateur photovoltaïque débite de la puissance

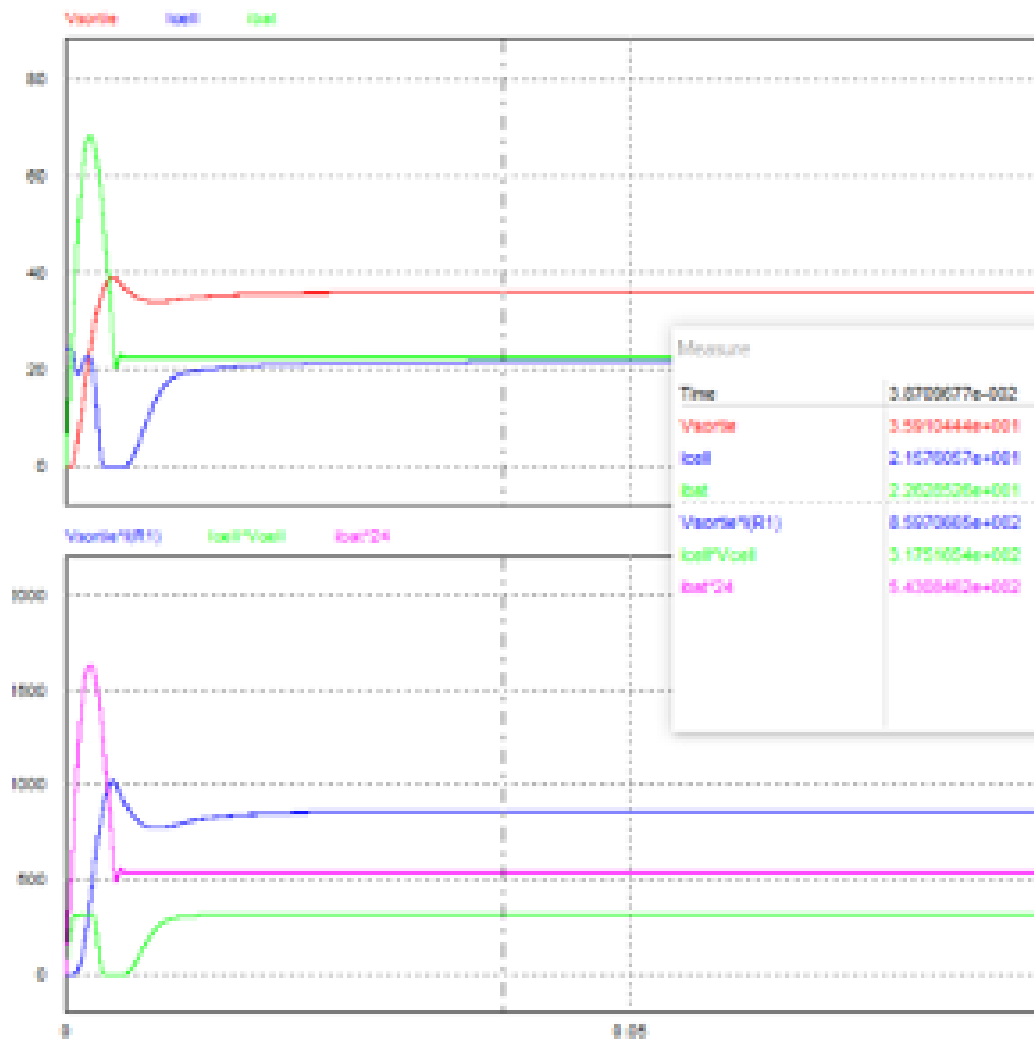


Fig. 4.28 – Le générateur photovoltaïque fournit son maximum de puissance et la batterie débite le reste de puissance pour alimenter une charge 860W

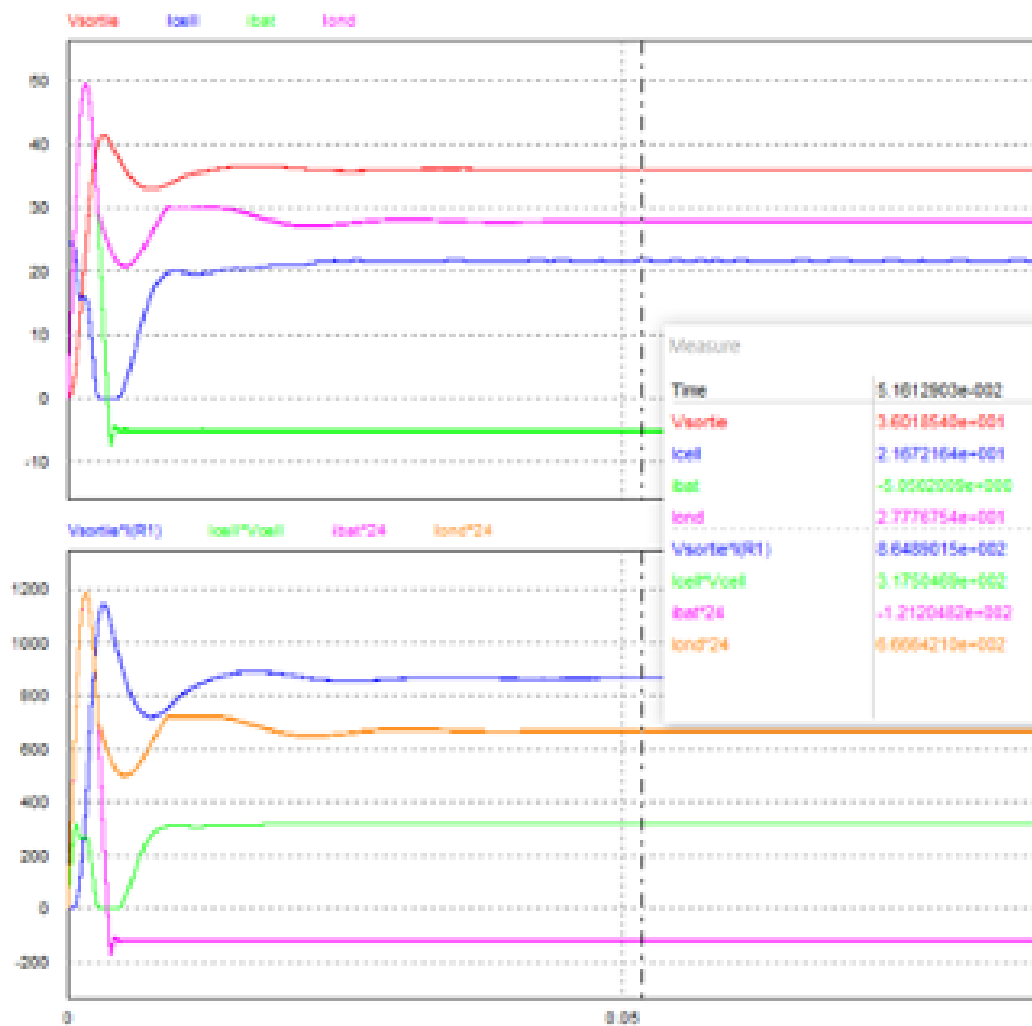


Fig. 4.29 – Le générateur photovoltaïque fournit sa puissance maximale, la batterie absorbe la puissance, les moteurs fonctionnent en génératrice et injectent de la puissance sur le bus continu

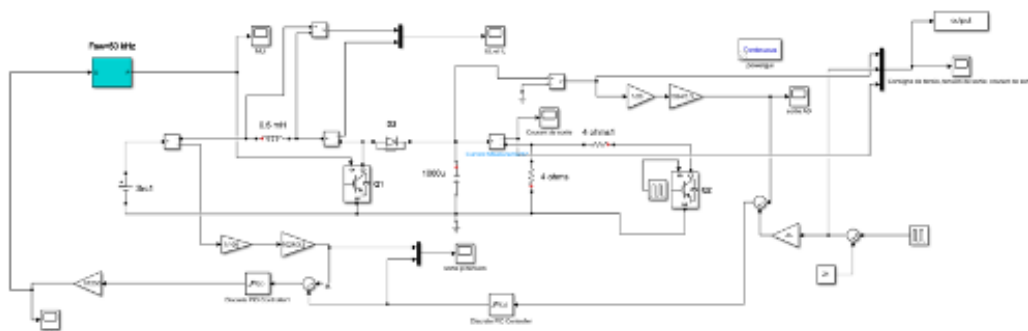


Fig. 4.30 – Le générateur photovoltaïque fournit sa puissance maximale, la batterie absorbe la puissance, les moteurs fonctionnent en génératrice et injectent de la puissance sur le bus continu

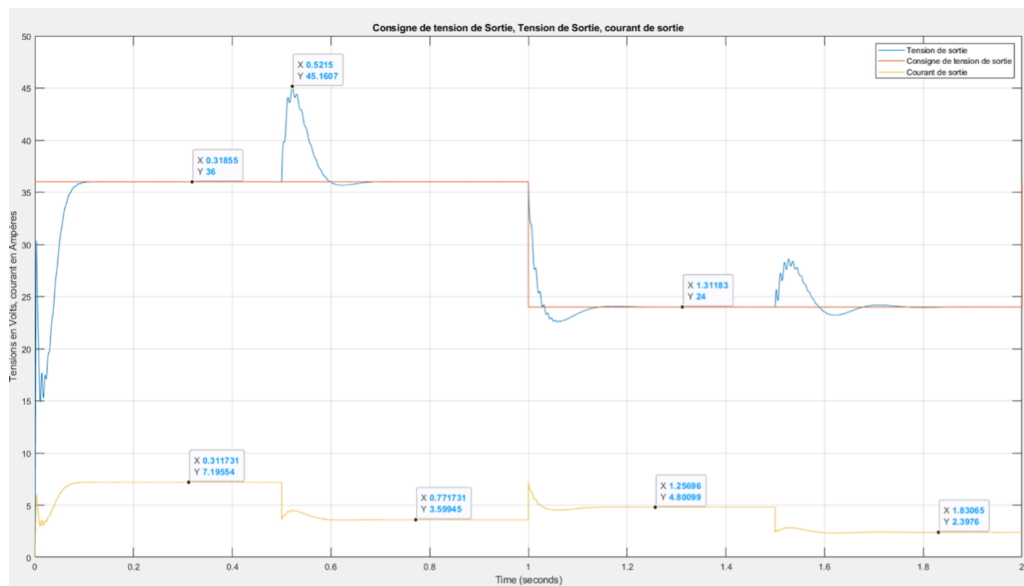


Fig. 4.31 – Le générateur photovoltaïque fournit sa puissance maximale, la batterie absorbe la puissance, les moteurs fonctionnent en génératrice et injectent de la puissance sur le bus continu

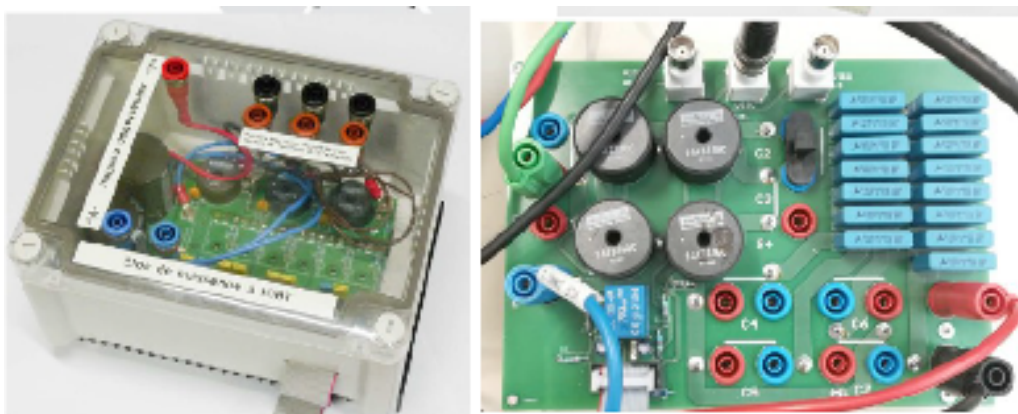


Fig. 4.32 – Le générateur photovoltaïque fournit sa puissance maximale, la batterie absorbe la puissance, les moteurs fonctionnent en génératrice et injectent de la puissance sur le bus continu

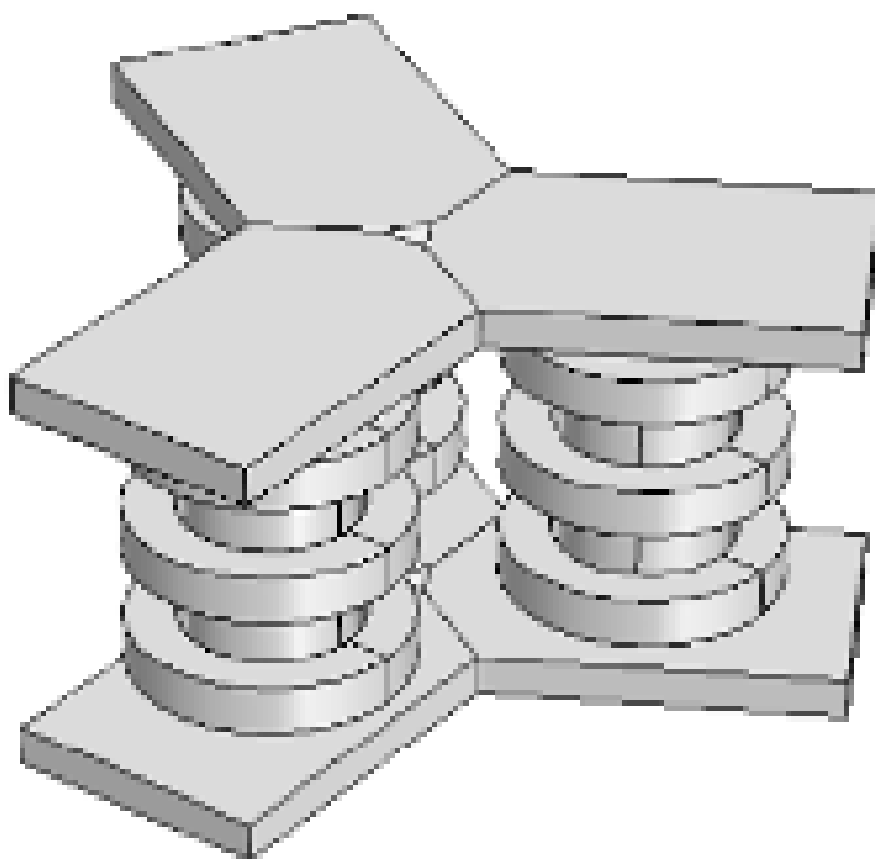


Fig. 4.33 – Le générateur photovoltaïque fournit sa puissance maximale, la batterie absorbe la puissance, les moteurs fonctionnent en génératrice et injectent de la puissance sur le bus continu

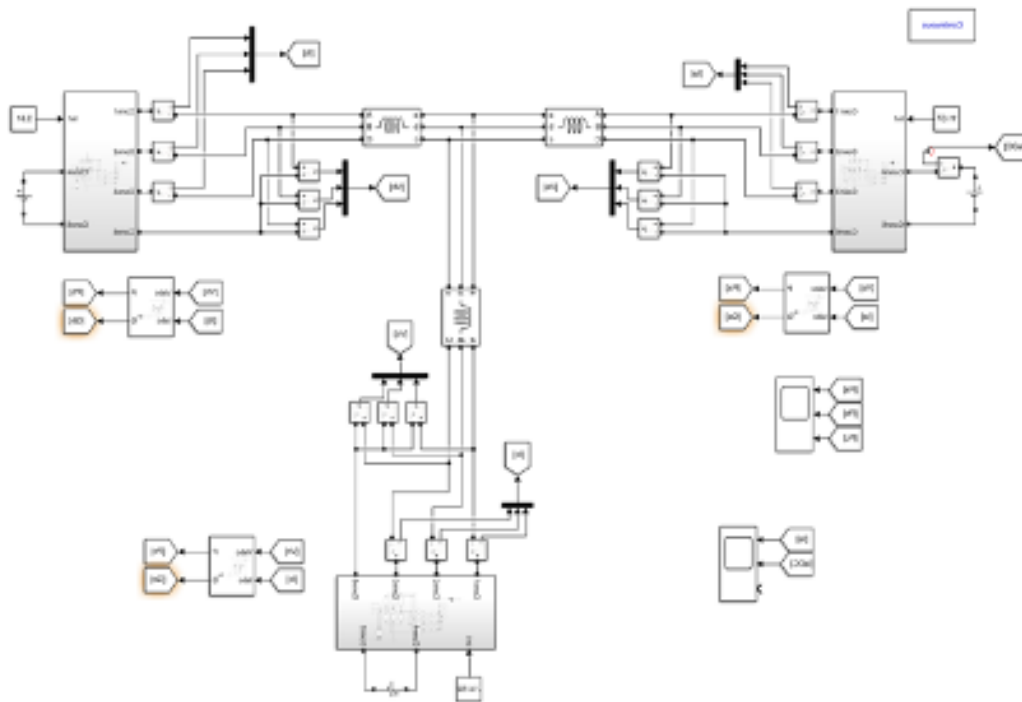


Fig. 4.34 – Le générateur photovoltaïque fournit sa puissance maximale, la batterie absorbe la puissance, les moteurs fonctionnent en génératrice et injectent de la puissance sur le bus continu

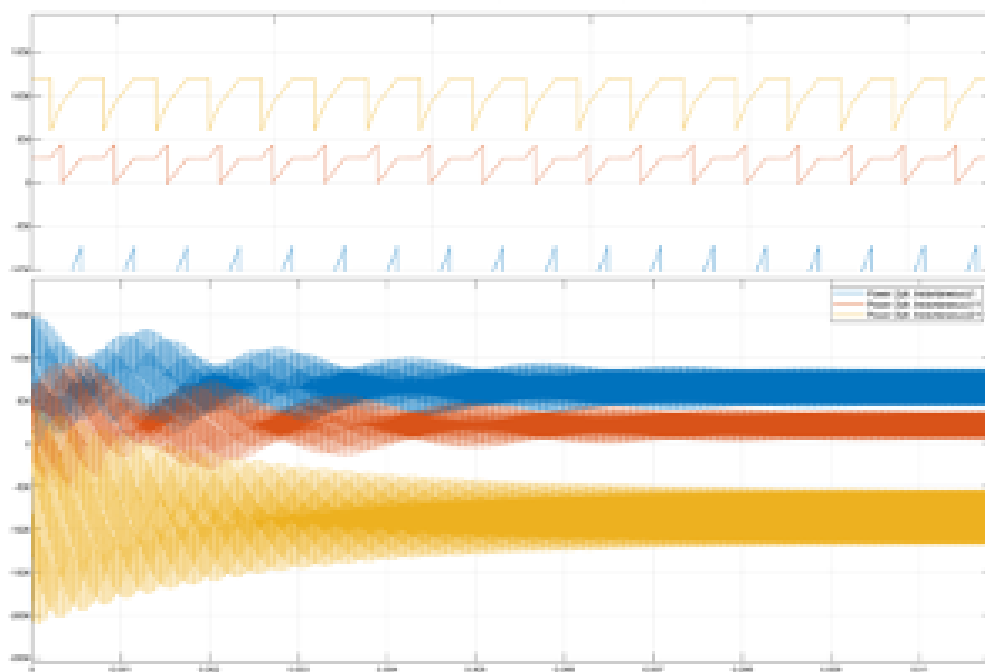


Fig. 4.35 – Le générateur photovoltaïque fournit sa puissance maximale, la batterie absorbe la puissance, les moteurs fonctionnent en génératrice et injectent de la puissance sur le bus continu

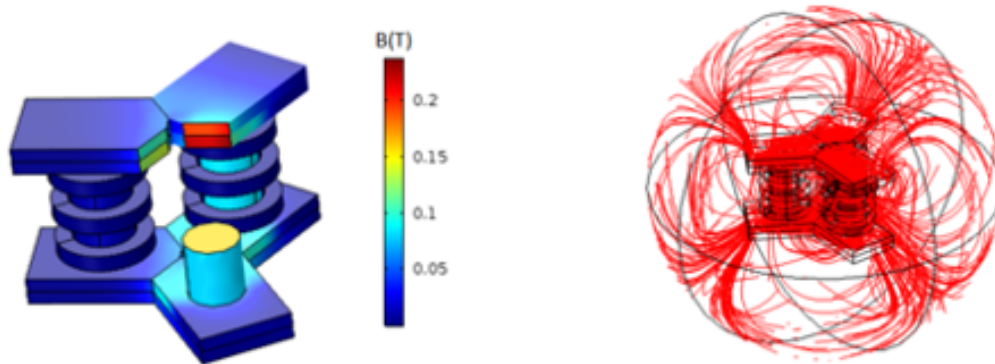


Fig. 4.36 – Le générateur photovoltaïque fournit sa puissance maximale, la batterie absorbe la puissance, les moteurs fonctionnent en génératrice et injectent de la puissance sur le bus continu

5 - LOT4 : Électronique : systèmes de contrôle - commande

Comme tout système embarqué autonome, la réalisation du prototype de démonstration du concept passe par une étude relative au dimensionnement du système. Les aspects mécanique sont traités dans le WP2. Les aspects électroniques sont abordés dans le WP4. Cette électronique devra répondre à diverses contraintes :

- faible consommation
- fiabilité
- implémenter l'algorithme de régulation

Une première partie de l'étude concerne la réalisation des algorithmes de régulation du système mécanique tel que défini par le lot 2. Cette régulation devra permettre la navigation sur les 4 foils lorsque l'ASV-Mobula est propulsé par son moteur électrique, et la stabilisation du système lorsque celui-ci est soumis à la propulsion vélique de son aile portante. Le livrable de cette première partie est un algorithme de régulation qui sera validé en simulation sur le modèle dynamique issu du lot 2. Cette validation permettra aussi la définition des mesures requises par la régulation et ainsi des capteurs nécessaires.

Une seconde partie est la définition de l'électronique d'alimentation et de régulation. Le choix des différents composants (CPU, capteurs, alimentations, ...) sera effectué et une étude préalable sur leur consommation énergétique. La réalisation pratique (intégration des algorithmes de régulation et câblage) suivra et des tests unitaires permettront la validation élémentaire de l'architecture électronique. Une interface utilisateur sera développée pour pouvoir effectuer les premiers tests de validation sur le terrain. Les performances du système pourront alors être comparées à celles estimées lors du calcul mécanique du lot 2.

Enfin, puisqu'il s'agit d'un système autonome les aspects l'évitement d'obstacle et le contrôle de mission seront abordé dans la mise en place d'un fonction d'optimisation.

5.1 Régulation

La régulation du Mobula doit permettre, par le contrôle de ses différents actionneurs (entrées), de stabiliser l'engin autour d'un état désiré. L'algorithme de commande considère une estimation de l'état courant, via les différents capteurs (sorties), et, par comparaison avec l'état désiré, calcule une fonction d'erreur dont il assure la minimisation. La structure d'une telle commande, couramment employée dans le domaine de la robotique marine, est appelée NGC : Navigation, Guidage, Contrôle. Du fait de son actionnement particulier, la régulation du Mobula doit aussi embarquer une gestion explicite de la redondance d'actionnement (Voile, 4 Foils, Propulseur et Safran). La stratégie de leur

allocation est l'objectif de l'étage d'actionnement. On parlera alors de structure S-NGC-A, dans la quelle S désigne l'espace Sensoriel qui n'est pas l'objet de la présente étude.

5.1.1 Modélisation dynamique de Mobula

La figure 5.1 expose la définition des différentes variables du porteur de Mobula (bateau sans l'aile). Un modèle dit ASV prenant en compte l'aile a également été développé Fig. 3.18, mais dans les deux stimulateurs le principe de la commande d'asservissement en position de la plateforme et des foils reste le même. Aussi pour des raisons de simplicité nous présentons les développements autour de la commande et de la régulation des foils sur le modèle sans l'aile. Le modèle du Mobula développé dans le cadre de la conception de son contrôle est composé des organes listés ci-dessous et reproduits à la figure 5.1. Dans ce qui suit, l'indice S désigne 'StarBoard' (Bâbord), P pour 'PortBoard' (Tribord), F pour 'Front' (Avant) et R pour 'Rear' (Arrière).

- Deux coques nommées $\mathcal{H}_S$ et $\mathcal{H}_P$.
- Quatre ensembles de jambes verticales et leur foil : $\mathcal{F}_{F,S}$, $\mathcal{F}_{R,S}$, $\mathcal{F}_{R,P}$ et $\mathcal{F}_{F,P}$. Ces quatre jambes peuvent être orientées verticalement d'un angle $\delta_{F,S}$, $\delta_{R,S}$, $\delta_{R,P}$ et $\delta_{F,P}$.
- Un safran nommé $\mathcal{R}$, pour 'Rudder' (Gouvernail). Il peut être orienté d'un angle δ_R .
- une propulseur $\mathcal{T}$, pour 'Thruster', associé à sa jambe verticale et qui produit une poussée T .

Ainsi les variables de commande du système sont :

$$\xi = [\delta_{F,S}, \delta_{R,S}, \delta_{R,P}, \delta_{F,P}, \delta_R, T]^T \text{ IMG} \quad (5.1)$$

Nous définissons 2 repères de références, avec une définition NED (North-East-Down) : le repère inertiel statique $\{0\}$ et le repère attaché au centre de masse du véhicule noté $\{B\}$. Les notations suivantes suivent la convention de la SNAME (REF). Le système est repéré dans le repère inertiel avec les variables :

$$\eta = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T \quad (5.2)$$

La vitesse absolue (par rapport à $\{0\}$), exprimée dans $\{B\}$ s'écrit :

$$\nu = [u, v, w, p, q, r]^T \quad (5.3)$$

Ainsi la relation cinématique associée à Mobula s'écrit sous la forme :

$$\dot{\eta} = R \cdot \nu \quad (5.4)$$

, avec R défini à l'annexe XXX. Le formalisme précédemment établi permet alors d'écrire le modèle dynamique de Mobula sous la forme :

$$\dot{\nu} = M((\eta))^{-1} \cdot (F_B(\xi, \eta, \nu) + D(\eta, \nu) + C(\eta, \nu) + G(\eta)) \quad (5.5)$$

La matrice M , les vecteurs D (damping), C (Coriolis) et G (Gravité et Flottabilité) sont définis à l'annexe XXX. $F_B(\xi, \eta, \nu)$ représente les forces engendrées par les organes actionneurs. Il faut noter que tous les précédents vecteurs représentent des forces et couples exprimés dans $\{B\}$.

La relation entre les entrées ξ et l'effort résultant F_B constitue le *modèle d'actionnement*, noté A , s'écrit sous la forme :

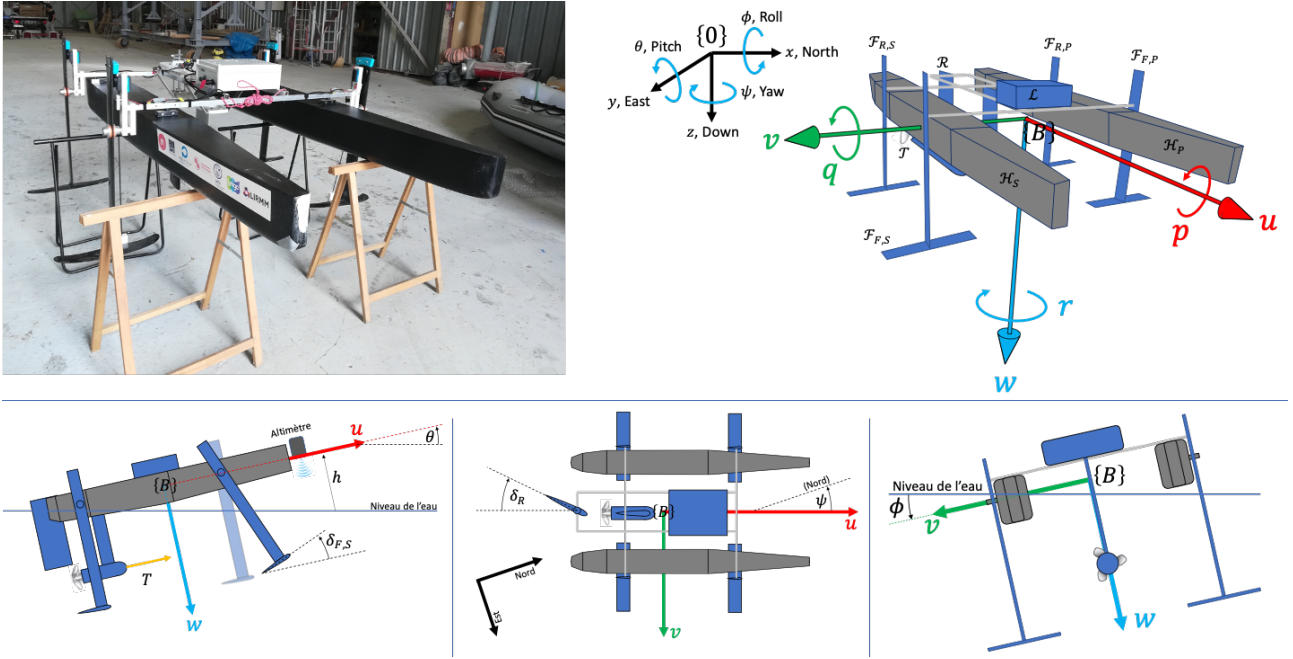


Fig. 5.1 – Notations

$$\begin{bmatrix} F_u \\ F_v \\ F_w \\ \Gamma_p \\ \Gamma_q \\ \Gamma_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T \\ f_v(\delta_r, T, \eta, \nu) \\ A_{\mathcal{F}} \cdot [\delta_{F,S}, \delta_{R,S}, \delta_{R,P}, \delta_{F,P}]^T \\ f_v(\delta_r, T, \eta, \nu) \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

où $A_{\mathcal{F}}$ est une matrice de rang 3 et dimension (3×4) , décrite en annexe XXX. Ainsi le modèle d'actionnement présente une redondance (plus d'actionneurs que de degrés de libertés impactés). Cette propriété est une particularité du Mobula et cette qualité sera exploitée lors de la conception de la commande.

Enfin l'estimation de l'état du système se fait par l'intermédiaire des capteurs embarqués :

- Une IMU qui mesure les angles absolus du système, ϕ , θ et ψ et les vitesses de rotation p , q et r .
- Un altimètre qui mesure la hauteur par rapport au niveau de l'eau : h .
- Un GPS RTK qui estime les positions x et y ainsi que les vitesses u et v .

5.1.2 Structure de commande (S)-NGC-A

Cette structure est un héritage de la Marine et vient du rôle de chacun dans la bonne marche du navire.

- Le Capitaine donne des ordres de haut niveau, relatifs à la mission. Son rôle est assuré par le système de gestion de mission : *Contrôle de mission*.
- Le Navigateur, son rôle est de répondre à deux questions : où suis-je ? et où vais-je ? Il dispose de cartes et de mesures sur l'état du système. C'est le *Système de Navigation*.
- Le Barreur reçoit des consignes du capitaine qui lui donne des objectifs, relatifs à l'avancement de la mission. Se référant au navigateur, il peut ainsi corriger l'allure du bateau. Mais le barreur

a une autre fonction, il a la science du terrain : il sait réagir à une mauvaise vague, lire le vent et déterminer la meilleure allure, éviter un écueil ou la route d'un cargo. Il est réactif et ordonne à la salle des machines. Il s'agit du *Système de Guidage*.

- Le Chef mécanicien interprète les consignes du barreur et, grâce à la connaissance qu'il a des capacités dynamiques du navire, calcule l'action globale que la manœuvre réclamée par le barreur nécessite. Il s'agit du *système de contrôle* qui conduit la salle des machines.
- La salle des machines distribue l'action globale sur chaque actionneur. Il s'agit de l'*étage d'actionnement*.

Cette vision, réduite, de la répartition des rôles dans un équipage se retrouve dans la commande du Mobula qui, structurée au sein de l'architecture algorithmique embarquée se décompose comme suit :

- Le Contrôleur de Mission : Il enchaîne les différents sous-objectifs en fonction de l'évolution de la mission globale
- La Navigation : d'après les données capteurs, elle est en charge de positionner le système et d'estimer sa vitesse, par rapport à l'objectif de la commande. S'il s'agit de suivre une route géo-référencée, la navigation sera dite globale. S'il s'agit de se référer au terrain, plus précisément à l'échantillonnage qu'en font les capteurs, elle sera qualifiée de locale. En d'autres termes, l'objectif du système de navigation est l'estimation de l'état du système, positions et vitesses, absolues et locales à l'éventuelle référence terrain.
- Le Guidage : le guidage porte la stratégie réactive d'approche de l'objectif. Il reçoit les objectifs courants de la mission, les adapte au terrain, et fabrique la fonction d'erreur. Un guidage minimaliste est un comparateur, qui soustrait une consigne mesurée à une référence. Il peut aussi considérer des critères complémentaires comme, l'évitement d'obstacle, le choix des allures...
- Le Contrôle : il reçoit la fonction d'erreur et calcule l'action globale.
- L'Étage d'actionnement : Il distribue sur les différents actionneurs les efforts à exercer sur l'environnement pour réaliser l'action globale issue du contrôle.

Une représentation schématique de cette commande est donnée à la figure 5.2.

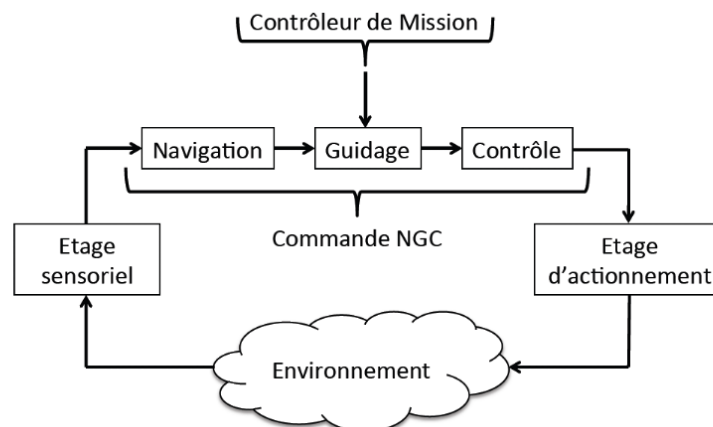


Fig. 5.2 – Schéma de principe de la structure de commande S-NGC-A

5.1.3 Conception de la commande

La question de la régulation se décompose en deux sous problèmes :

- Stabilisation de l'assiette du système et contrôle de vol : considérant les différentes mesures capteurs (ϕ , θ , ψ et h), calculer les consignes actionneurs ($\delta_{F,S}$, $\delta_{R,S}$, $\delta_{R,P}$, $\delta_{F,P}$, δ_R et T) pour que les paramètres de vol (ϕ , θ , ψ et h) convergent uniformément vers des valeurs désirées (ϕ_d , θ_d et h_d).
- Contrôle de la trajectoire : considérant une référence à atteindre (point de passage x_d et y_d ou cap désiré ψ_d), calculer les consignes actionneurs (δ_R et T) pour que le système rejoigne sa référence.

La décomposition de ces deux boucles de régulation suivant la structure (S)-NGC-A précédemment exposée conduit à l'architecture représentée à la figure 5.3.

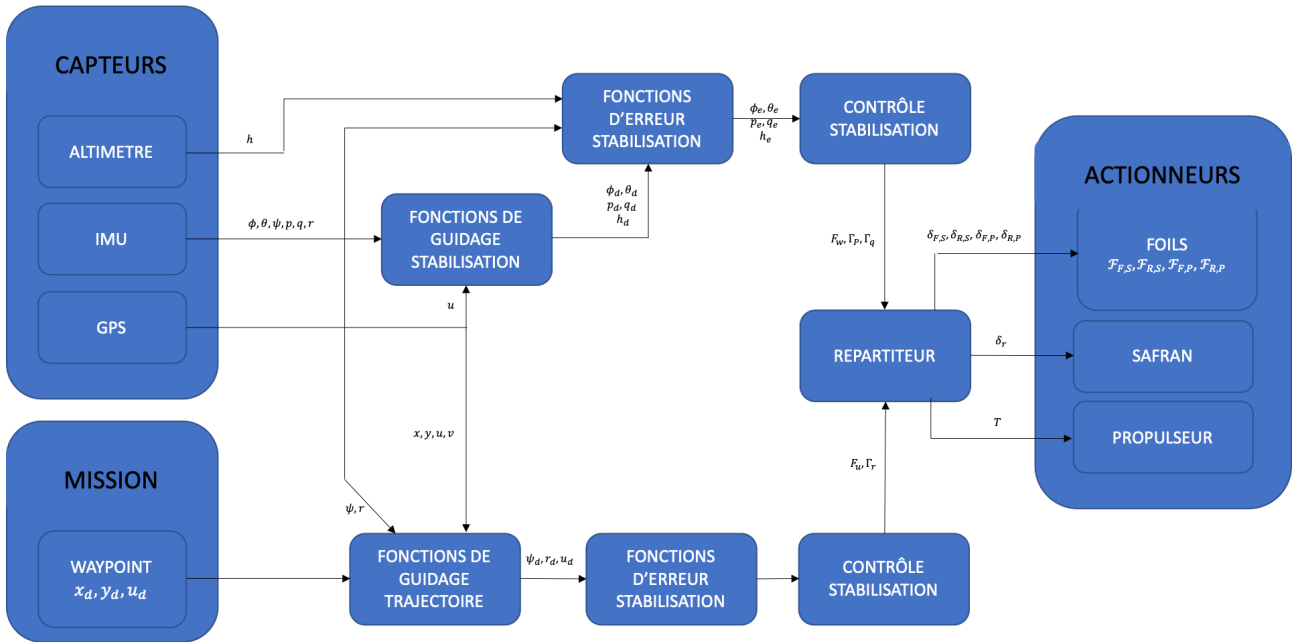


Fig. 5.3 – Structure de la Commande

5.1.3.1 Stabilisation de l'assiette du système et contrôle de vol

La commande doit permettre la régulation des paramètres de vol (ϕ , θ et h) vers des valeurs désirées (ϕ_d , θ_d et h_d). Ces valeurs désirées peuvent être statiques, e.g. $\phi_d = 0$, $\theta_d = 0$ pour un vol 'à plat', ou résultantes de fonctions de guidage qui assurent de meilleures performances dynamique et une gestion explicite des couplages dynamiques du système. Nous définissons ainsi deux fonctions de guidage permettant la prise de gîte lors des virage et une gestion dynamique de la phase de déjaugage.

- Gestion de la prise de gîte lors des virages : ce guidage se s'inspire du principe du 'wagon oscillant'. Il permet de d'aligner les efforts de gravité et centripète sur le vecteur w exprimant la verticale dans le repère de l'engin $\{B\}$. Ce guidage s'exprime simplement par l'équation :

$$\phi_d = \frac{r \cdot v}{g} \quad (5.7)$$

- Gestion de la phase de déjaugage : le guidage de la phase de décollage impacte les valeurs désirées z_d et θ_d . La hauteur désirée de survol de la surface de l'eau dépend de l'état de mer et est considérée comme un réglage issu du pilote. La constante θ_{max} désigne le tangage maximal autorisé pour faciliter le décollage. Il faut noter l'avantage que procure ce guidage en tangage,

Tab. 5.1 – valeur des gains de contrôle

	K_P	K_I	K_D
z_c	100	500	10
ϕ_c	800	0	100
θ_c	800	100	200

il permet d'orienter la poussée moteur vers l'altitude désirée, comme le fait le réglage du 'Trim' d'un moteur hors bord. Ainsi on donne arbitrairement les lois de guidage suivantes :

$$z_d = h_d \cdot \tanh(k_z \cdot v) \theta_d = \quad (5.8)$$

$$\theta_d = \theta_{max} \cdot \tanh k_\theta(z_d - z) \quad (5.9)$$

Les fonctions d'erreur issues de cette stratégie de guidage sont :

$$\begin{aligned} \phi_e &= \phi_d - \phi \\ \theta_e &= \theta_d - \theta \\ z_e &= z_d - z \end{aligned} \quad (5.10)$$

Ainsi l'accélération désirée issue de cette stratégie peut s'écrire :

$$\begin{aligned} \ddot{z}_c &= \ddot{z}_d + K_P^z \cdot (z_d - z) + K_I^z \cdot \int_{\tau=0}^t (z_d(\tau) - z(\tau)) d\tau + K_D^z \cdot (\dot{z}_d - \dot{z}) \\ \ddot{\phi}_c &= \ddot{\phi}_d + K_P^\phi \cdot (\phi_d - \phi) + K_I^\phi \cdot \int_{\tau=0}^t (\phi_d(\tau) - \phi(\tau)) d\tau + K_D^\phi \cdot (\dot{\phi}_d - \dot{\phi}) \\ \ddot{\theta}_c &= \ddot{\theta}_d + K_P^\theta \cdot (\theta_d - \theta) + K_I^\theta \cdot \int_{\tau=0}^t (\theta_d(\tau) - \theta(\tau)) d\tau + K_D^\theta \cdot (\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) \end{aligned} \quad (5.11)$$

les termes K étant des gains positifs à régler. L'inversion de la relation 5.5 permet alors de déterminer l'effort résultant que les actionneurs doivent appliquer sur la plate-forme pour réaliser les fonctions de guidage précédemment décrites. Enfin la pseudo-inversion (Moore-Penrose) de la matrice $A_{\mathcal{F}}$ permet de d'allouer à chaque foil l'effort qu'il doit exercer. Un inversion de la caractéristique hydrodynamique (Eppler 817) de chacun des foils permet alors de déterminer l'angulation que chacun d'eux doit avoir par rapport au flux d'eau.

Les simulations suivantes permettent d'apprécier les performances amenées par cette solution de guidage. La première (figure 5.4) servira de référence et représente l'évolution des variables d'état du système lorsqu'il est soumis à une propulsion constante $T = 30N$. L'angle du gouvernail est initialement nul $\delta_r = 0$ sur les 10 premières secondes de simulation. Il est ensuite fixé à $\delta_r = 0.3rad$ sur les 10 suivantes et $\delta_r = -0.3rad$ sur les 10 dernières.

Les courbes de la figure 5.4 montrent que le système atteint une vitesse de $u_\infty = 1.63m/s$ et que la poussée constante du moteur induit une prise de tangage faible, $\theta_\infty = 0.054rad$. Les simulations rapportées à la figure C.1 ont été effectuées pour une altitude désirée $h_d = 0.2m$ et montrent clairement les avantages amenées par l'utilisation des foils. Cependant cette simulation est menée sans fonction de guidage, le système décolle en régulant ses tangage et roulis à 0. La valeur des gains de contrôle utilisés pour cette simulation est donnée à la table 5.1.

Les simulations rapportées à la figure C.1 montrent le comportement du système soumis aux mêmes conditions de poussée et d'activité du gouvernail. Le système atteint sa régulation dans les 10 premières secondes, alors que le gouvernail est à $\delta_r = 0$. La vitesse permanente atteinte en fin de trajectoire est de $u_\infty = 7.1m/s$ montrant les avantages d'utiliser une structure de foils. Le système atteint ses conditions de déjaugage à $t = 4.13s$ après une période de saturation des foils comme

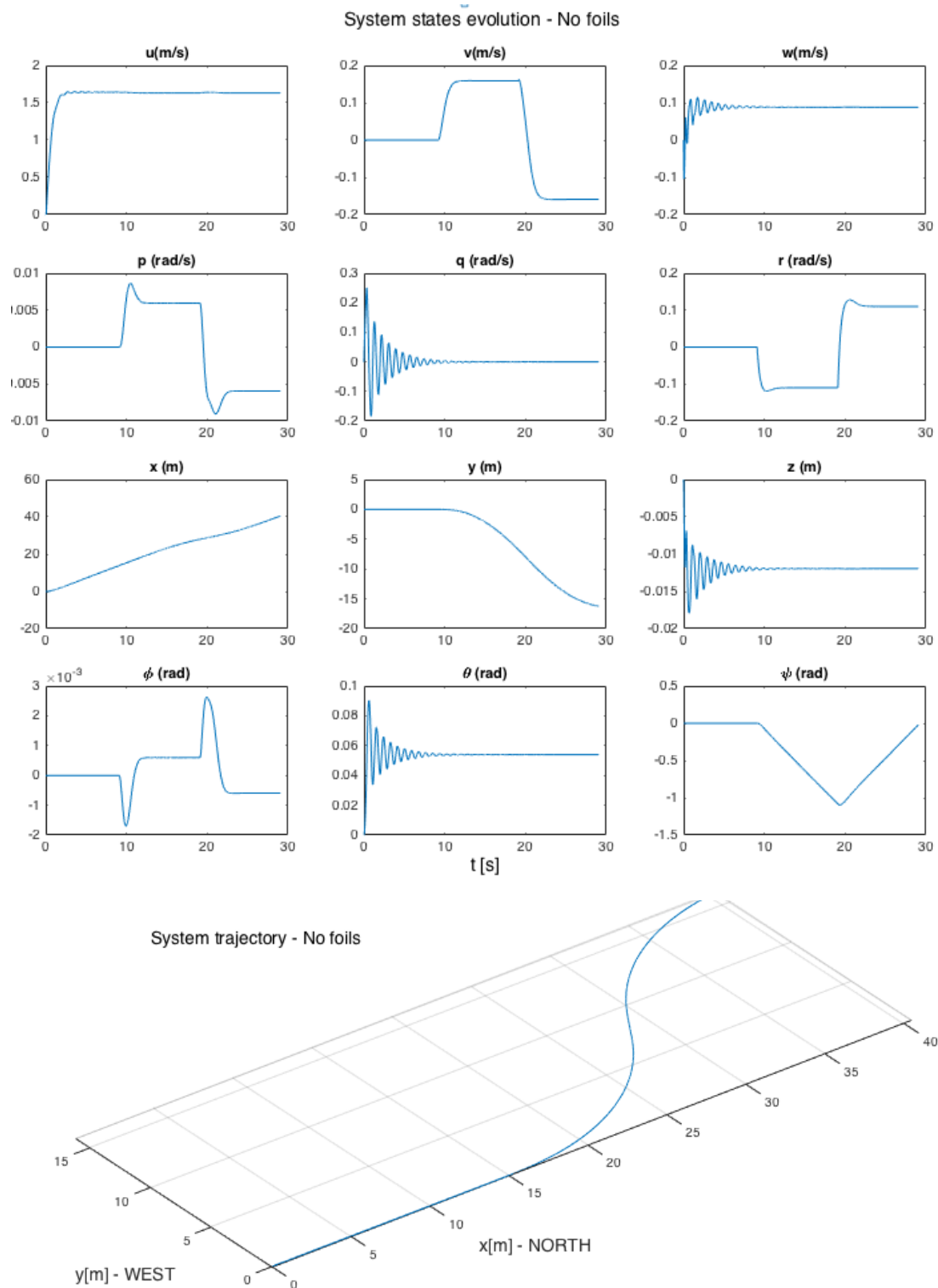


Fig. 5.4 – Evolution de l'état du système (haut) et sa trajectoire résultante (bas), sans foils

Tab. 5.2 – Paramètres des fonctions de guidage

k_z	$\theta_{\max}$	k_θ
0.8	0.2	5

l'indiquent les courbes C.1-(bas-droite). le premier coup de barre ($\delta_r = 0.3rad$ à $t = 10s$) induit une fiable prise de roulis, de l'ordre de $\phi = 7 \cdot 10^{-3}rad$ pendant que le système maintien sa régulation autour des valeurs désirées. Le second coup de barre ($\delta_r = -0.3rad$ à $t = 20s$) est plus problématique. Il engendre une réaction qui conduit à la saturation des actionneurs et le système n'est plus en mesure de maintenir sa régulation. Il amerit pour déjauger à nouveau par la suite. Finalement la trajectoire réalisée est montrée à la figure C.1-(bas-gauche). On constate cependant la plus grande longueur de cette trajectoire par rapport à la précédente (sans foils). La troisième simulation, rapportée à la figure C.2, implémente la stratégie de guidage proposée ci-dessus. Les paramètres de guidage sont indiqué à la table 5.2.

Les références de guidage sont indiquées en rouge, sur la figure C.2. Ces simulations indiquent que les actionneurs sont poussés à saturation seulement en début de simulation, et sur une courte durée. La réponse dynamique du système est clairement meilleure et les références de guidage sont suivies. Enfin la trajectoire reproduite à la figure C.2-(bas-gauche) indique une trajectoire qui présente des courbures bien plus importantes montrant ainsi une capacité de manoeuvre accrue par l'utilisation des fonctions de guidage. Un dernier jeu de simulation est proposé à la figure C.3. Il permet de montrer la gestion de la redondance d'actionnement. Cette simulation est effectuée avec les paramètres précédents, mais un des foils est fixé à une valeur constante (situation de foil bloqué), $\delta_{B,p} = -0.1rad$ à partir de $t = 6s$.

L'analyse des courbes de la figure C.3 indique un comportement similaire au précédent malgré le blocage d'un des foils. Il faut cependant noter que cette situation pousse les autres actionneurs à compenser cette perte d'actionnement et qu'ils sont susceptibles d'être plus facilement poussés à saturation. La valeur choisie pour le blocage du foil est proche de sa valeur statique que la régulation complète atteint. Ainsi la situation simulée est particulièrement favorable. Une étude plus complète sur cette question est nécessaire.

5.1.3.2 Contrôle de la trajectoire

Parmi les 6 degrés de libertés (DDL) du système, 3 sont déjà contraints par la régulation de l'assiette précédemment exposée. Ainsi, les DDL restant à asservir sont

- u , il est actionné directement par la propulsion T ,
- v , n'est pas directement contrôlable. Cependant les plans anti-dérive formés par les jambes de foil, la jambe du propulseur et le safran assurent une stabilité naturelle à ce DDL.
- r est actionné par le gouvernail, δ_r ,

Ainsi le contrôle de la trajectoire se fait par la régulation du gouvernail, étant donné une force de propulsion actionnée en boucle ouverte. Il s'agit ici d'une stratégie de régulation classique de type *suivi de chemin* à laquelle répond les guidages de type *Line Of Sight* (LOS) ou le principe de la *cible virtuelle*. Nous définissons le chemin $\mathcal{P}$ comme constitué d'une série de n *Waypoints* W_i que le contrôleur de mission doit enchaîner séquentiellement. Le chemin est donc défini comme :

$$\mathcal{P} = \{W_1, W_2, \dots, W_i, \dots, W_n\} \quad (5.12)$$

où W_i désigne le point de passage i , dont on connaît les coordonnées absolues (x_i, y_i) . La cap désiré est donc défini par :

$$\psi_d = \text{atan2}\left(\frac{y_i - y}{x_i - x}\right) \quad (5.13)$$

où $\text{atan2}()$ est l'arctangente 4 quadrants. Le contrôle cinématique est simplement écrit comme la structure suivante :

$$\Gamma_r = \ddot{\psi}_d + K_D^\psi \cdot (\dot{\psi}_d - \dot{\psi}) + K_P^\psi \cdot (\psi_d - \psi) \quad (5.14)$$

5.1.4 Planification de chemin

La question de la planification du chemin à suivre (via la définition des différents waypoints) doit considérer l'ensemble des critères dépendants de la trajectoire, i.e propulsion vélique, capacité d'accumulation d'énergie du système, via les panneaux solaires montés sur la voile et le fonctionnement en hydrolienne du moteur de propulsion... Cette planification sera le résultat d'une procédure d'optimisation globale.

Le Mobula est constitué de différents organes actifs (cf Figure 5.5) qu'on peut classer comme suit :

- Les organes générateurs de propulsion : moteurs électriques (en mode propulsion), voile, foils
- Les organes générateurs d'énergie : panneau solaire, moteur électrique (en mode hydrogénérateur)

Ainsi la considération des différents modèles de production ou de consommation énergétique alimentera la fonction d'optimisation qui déterminera la route à suivre. Dans un premier temps, des modèles simplifiés seront considérés. Ils sont exposés dans ce qui suit.

5.1.4.1 Panneau Solaire

La capacité de production électrique du panneau solaire est modélisée en fonction de l'angle d'incidence des rayons solaires par rapport au panneau. Cet angle est désigné par λ_S . Le panneau produit alors un courant I_S sous une tension (considérée comme constante) V_S , comme l'indique la figure 5.6.

5.1.4.2 Moteur électrique réversible

Les moteurs électriques montés sur Mobula peuvent fonctionner en propulseur (consommation électrique) ou en hydrogénérateur (production électrique), en fonction de la vitesse relative du flux d'eau qui passe dans l'hélice. Un modèle simpliste est considéré, il est illustré à la figure 5.8.

5.1.4.3 Propulsion vélique

La modélisation de la propulsion vélique est approché en considérant les modes de conduite d'un bateau à voile. Les caractéristiques considérées sont les suivantes :

- les allures : les allures définissent les modes de conduite d'un bateau à voile en fonction de l'angle d'incidence du vent relatif sur la voile. Sont définies les allures suivantes : *Vent Debout*, *Prés*, *Bon Plein*, *Travers*, *Largue* et *Vent Arrière*. Ces différentes allures sont reproduites à la figure 5.8.
- les amures, *Babord Amure* ou *Tribord Amure*, pour la prévention des collisions et la définition des états dynamiques de voile.
- les états dynamiques de la voile : *Propulsive*, *Régressive* ou *Faseyante*.

Ces différents modèles sont implantés dans un simulateur qui permettra de servir d'illustration et d'interprétation des résultats de l'algorithme d'optimisation décrit dans la suite.

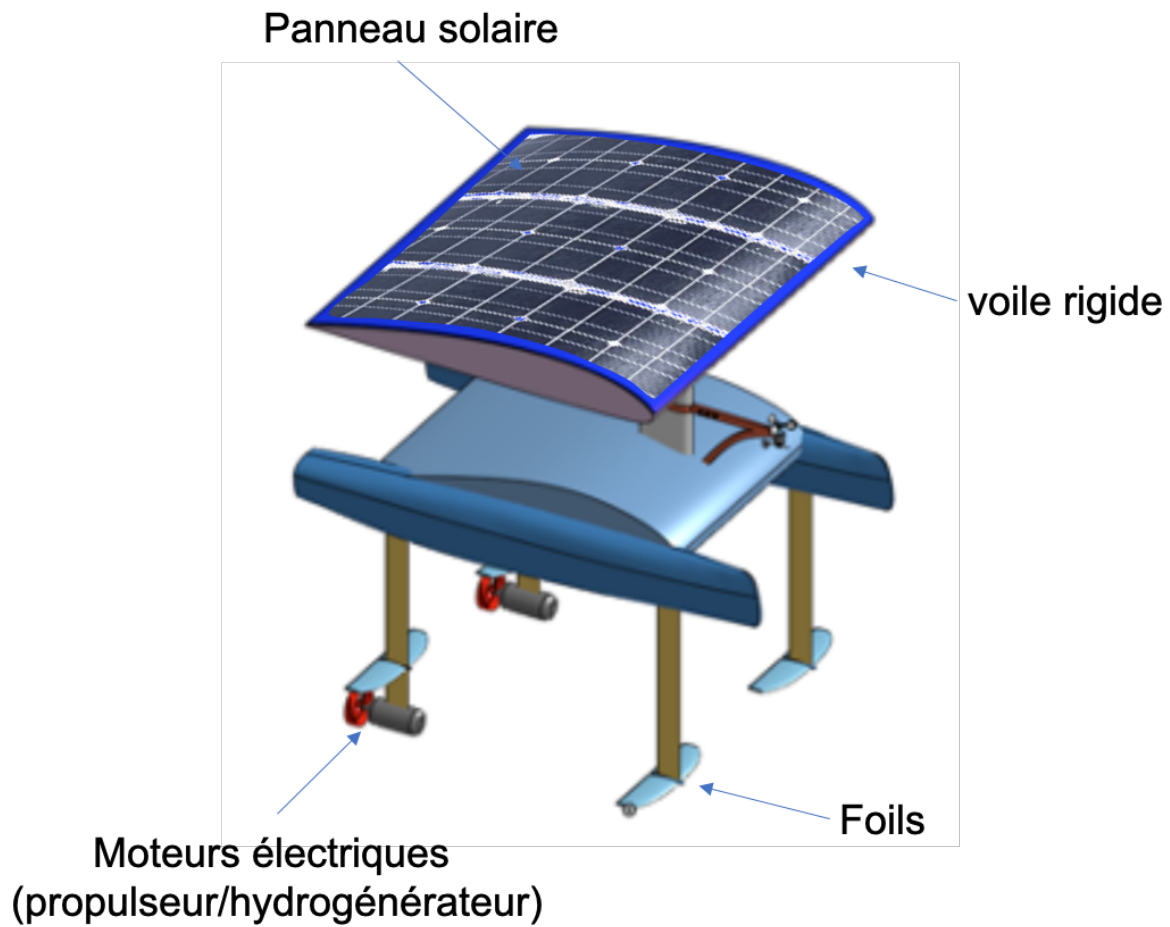


Fig. 5.5 – Les organes actifs de Mobula

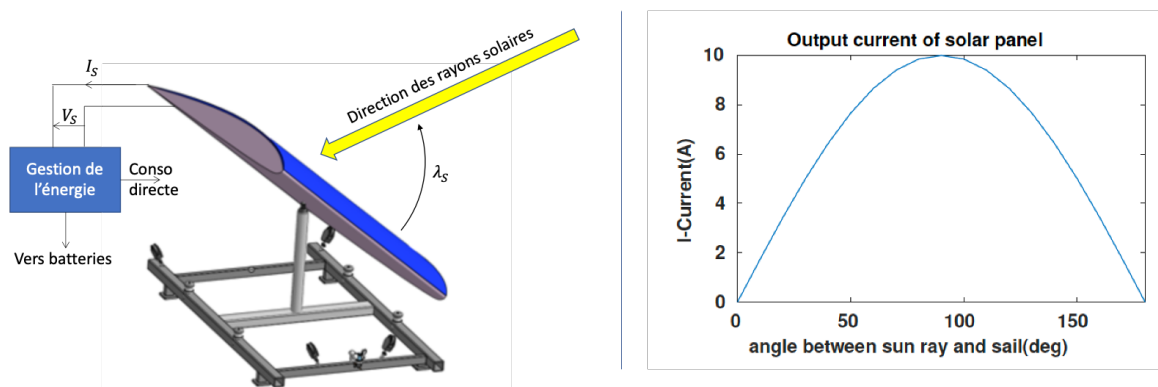


Fig. 5.6 – Modèle de production électrique du panneau solaire

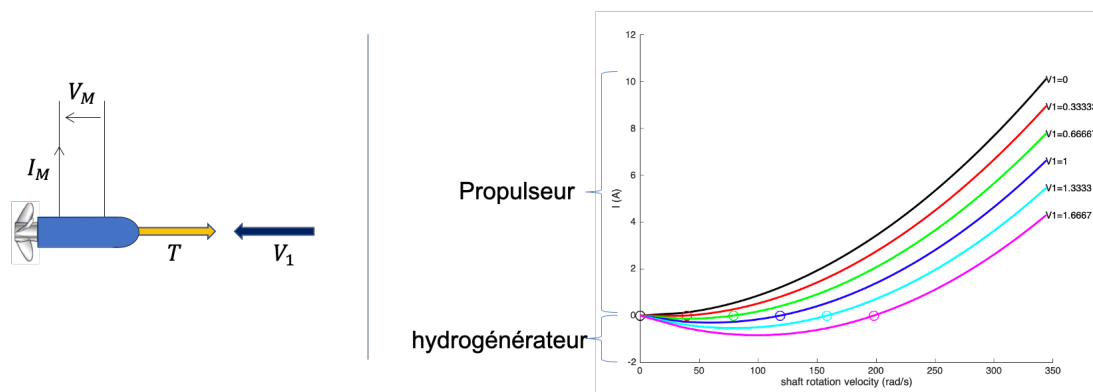


Fig. 5.7 – Modèle du moteur réversible propulseur/ghydrogénérateur

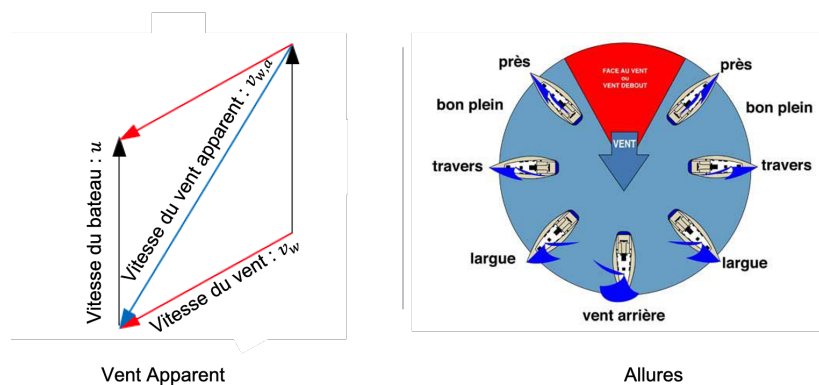


Fig. 5.8 – Définition du vent apparent et des allures du bateau

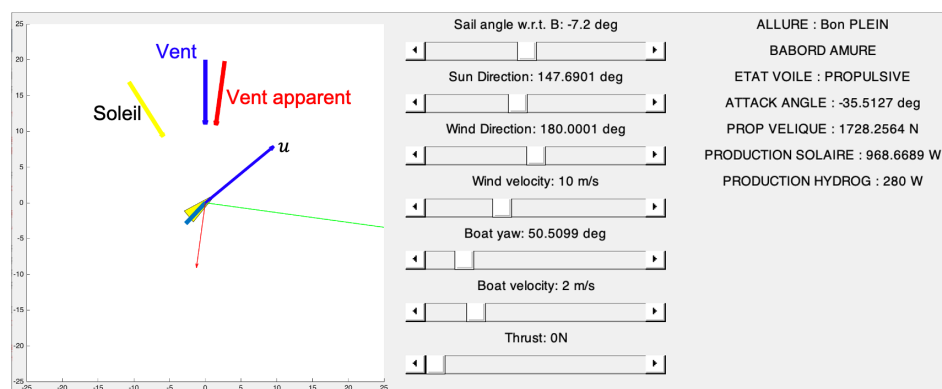


Fig. 5.9 – Simulateur des allures du bateau et des organes de production/consommation électrique

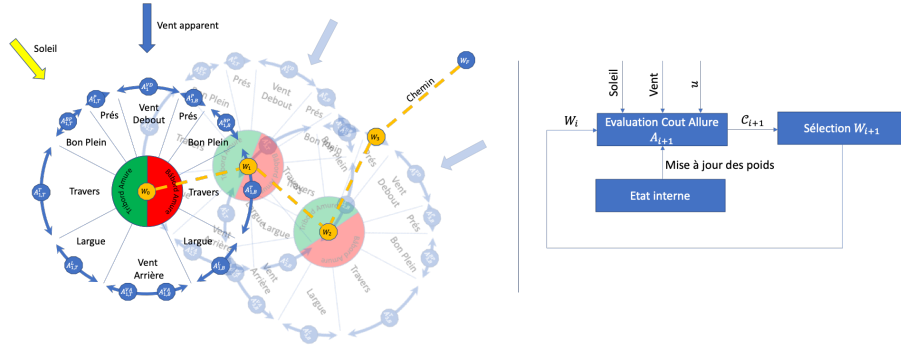


Fig. 5.10 – Simulateur des allures du bateau et des organes de production/consommation électrique

5.1.4.4 Fonction d'optimisation

Le processus d'optimisation doit fournir la route à suivre pour rejoindre un point donné, par la définition de différents waypoints qui définissent le chemin à suivre, de manière à minimiser la consommation énergétique, maximiser la production énergétique, minimiser le temps de parcours estimé et la distance parcourue. A chaque waypoints, on évalue une fonction de cout relative aux différentes allures A possibles (cf figure 5.10), maintenue sur une distance d :

$$\mathcal{C}(A, d) = \mu_S \cdot \epsilon_S(A, d) + \mu_P \cdot \epsilon_P(A, d) + \mu_M \cdot \epsilon_M(A, d) + \mu_D \cdot \epsilon_D(A, u, d) + \mu_T \cdot \epsilon_T(A) \quad (5.15)$$

où μ_S , μ_P , μ_M , μ_D et μ_T sont des poids dont l'évolution est définie par la suite et :

- $\epsilon_S(A, d)$ représente la production d'énergie solaire déterminée par l'angle d'incidence des rayons du soleil sur la voile, cette dernière étant réglée en fonction de l'allure A considérée,
- $\epsilon_P(A, d)$ représente l'énergie consommée par le moteur (<0) ou produite par l'hydrolienne (>0).
- $\epsilon_M(A, d)$ représente un critère relatif à la direction de la poussée totale F_T (voile et/ou propulseur) générée sur le système par rapport à l'objectif W_F , i.e. $\epsilon_M(A, d) = F_T \cdot (W_F - X)$,
- $\epsilon_D(A, u, d)$ représente le cout de déplacement en termes d'énergie mécanique dissipée par le système. Il faut noter que cette énergie mécanique va être grandement influencée par l'état du système qui sera en vol, ou pas, en fonction de la vitesse u et de la régulation de l'assiette précédemment exposée.
- $\epsilon_T(A)$ représente le cout énergétique engendré par un changement d'allure.

Les différents poids associés au calcul du cout peuvent évoluer en fonction de l'état interne du système. Par exemple une charge faible de batterie privilégiera un trajet optimisant la production électrique, solaire ou hydrolienne, au détriment de la minimisation immédiate de la distance à l'objectif. Les Waypoints seront alors déterminés par optimisation des réglages de voile et de propulsion une fois que l'allure suivante aura été déterminée.

La mise en forme de cette fonction d'optimisation est actuellement en cours et de prochains résultats sont attendus.

5.2 Électronique de Commande

A toi Laurent ! si l'organisation des chapitres te convient !

6 - Point d'avancement et Perspectives à moyen terme

Dans le cadre du projet ASV-Mobula des études hydrodynamiques et aérodynamiques ont été menées afin de déterminer les efforts sur la structure pour faire le dimensionnement des prototypes. Actuellement 2 prototypes sont en cours de finalisation : la plateforme avec 4 foils asservis (nous en sommes à la version2) et le démonstrateur de l'aile robotisée. Comme les solutions techniques ne sont pas encore fiabilisées les dessins techniques ne sont pas présentés dans ce rapport. Un simulateur permettant de tester les lois de commandes a été développé ainsi qu'une fonction d'optimisation qui prend en compte des modèles d'ordre 0 pour les différentes variables du problème.

A moyen terme il reste à :

- finaliser la construction du démonstrateur de l'aile robotisée et commencer à faire les mesures sur les efforts mécanique, et sur l'énergie disponible via les panneaux solaires,
- Finaliser la conception des systèmes et produire les dessins techniques.
- ...
- fiabiliser les modèles à introduire dans la fonction d'optimisation,
- refaire des essais avec la plateforme avec les nouveaux actionneurs,
- confronter les mesures et les prévisions obtenus à l'aide du simulateur sur la plateforme avec les foils asservis,
- préparer la fusion des deux solutions,
- réfléchir à la prise de décision au regard de l'environnement direct ou futur,
- rédiger le rapport final.

Bibliographie

- [1] André Deperrois. XFLR5 analysis of foils and wings operating at low reynolds numbers. *Guidelines for XFLR5*, 2009.
- [2] Mark Drela and Michael B Giles. Viscous-inviscid analysis of transonic and low reynolds number airfoils. *AIAA journal*, 25(10) :1347–1355, 1987.
- [3] Yoann Robert. *Simulation numérique et modélisation d’écoulements tridimensionnels instationnaires à surface libre. Application au système bateau-avirons-rameur*. PhD thesis, Ecole Centrale de Nantes, 2017.

A - Annexes Lot1

A.1 La liste des membres du projet et des structures

La liste des permanents :

- Pr. L. Daridon (LMGC),
- Pr. S. Dumont (IMAG),
- Mcf. K. Godary-Dejean (LIRMM),
- Pr. L. Latorre (LIRMM),
- Mcf. L. Lapierre (LIRMM),
- Mcf. T. Martiré (IES),
- Pr. D. Matt (IES)
- M. A. Fuchs (Corespondant SEAPROVEN)

La liste des CDD :

- M. Malek Boufatah (Stage master 2 - mars 2021/juillet 2021),
- M. Yoann Robert (Ingénieur Hydro, - CDD 18mois - Oct.2019/Fév.2020) ,
- M. Loïc Waimitan (Stage master 2 - Mar.2020/Jui.2020),
- M. DANG-HUU Tho, (Ingénieur d'étude - CDD 12 mois - Janv.2021/Dec.2021,
- ?? (IES),
- ?? (IES),

Les quatre laboratoires de l'Université de Montpellier :

- l'Institut Montpelliérain Alexander Grothendieck (IMAG – UMR 5149),
- l'IES Institut d'Electronique et des Systèmes (IES - UMR 5214),
- le Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier (LIRMM - UMR 5506),
- le Laboratoire de Mécanique et Génie Civil (LMGC - UMR 5508),

et la société SEAPROVEN.

A.2 Présentation du projet ASV-Mobula lors de l'évaluation du LMGC par l'HCERES

Projet ASV - Mobula

Projet cofinancé par le Fonds Européen de Développement Régional

L'objectif principal : Développer un engin de surface innovant et autonome

Les partenaires :

LIRMM :	L. Lapierrre - L. Latorre - K. Godary-dejean
IES :	D. Matt - T. Martire
Sea Proven :	F de Varenne - A. Fuchs
IMAG :	S. Dumont
LMGC :	L. Daridon - Y. Robert

Bénéficiaire : **L. DARIDON** (porteur du projet)
Montant total : 483 782,43 €
Dont financement européen : 193 275,37 €

Conception

Simulation

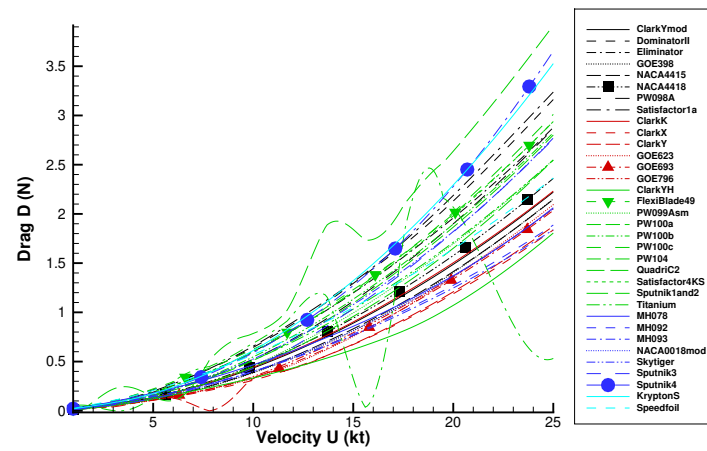
Expérimentation

Mobula

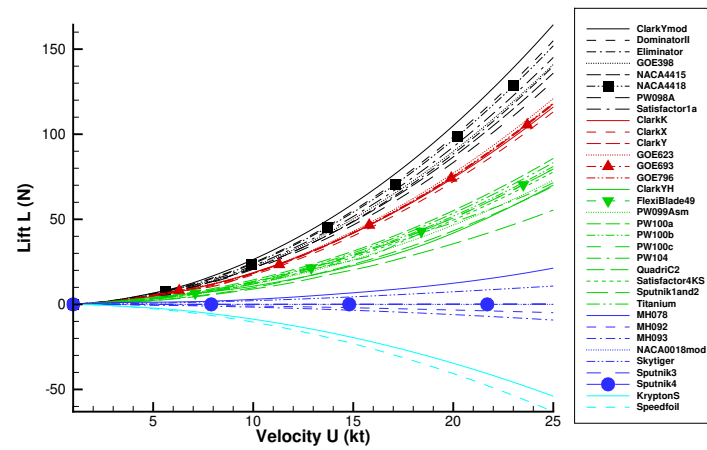
LABORATOIRE DE MÉCANIQUE ET GENIE CIVIL - UNIMONTPELLIER
www.lmgc.univ-montpel.fr

B - Annexes Lot2

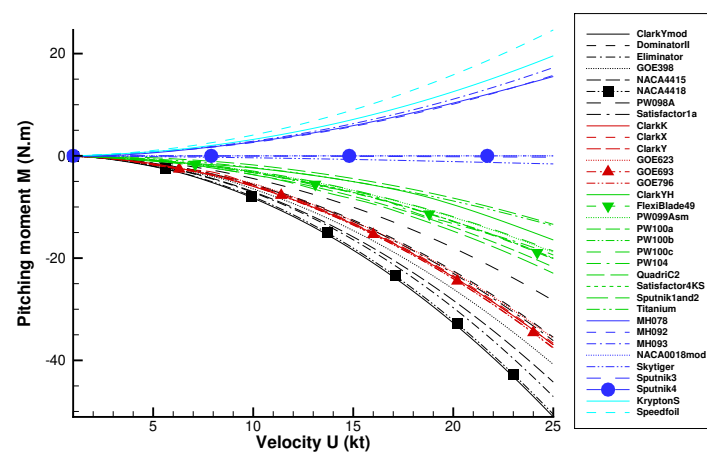
B.1 Les efforts aérodynamique sur l'aile



(a) Traînée

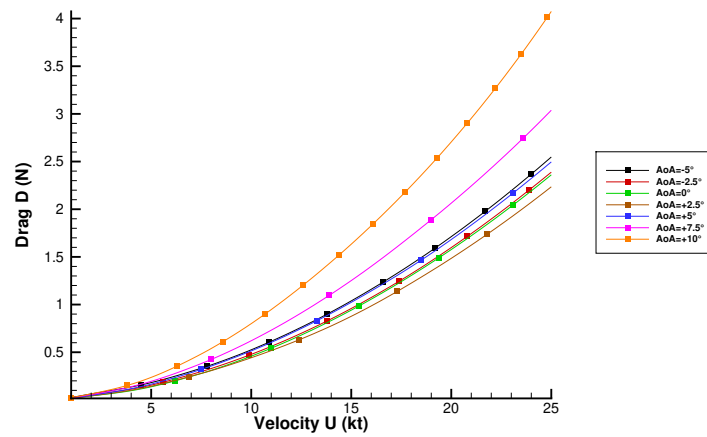


(b) Portance

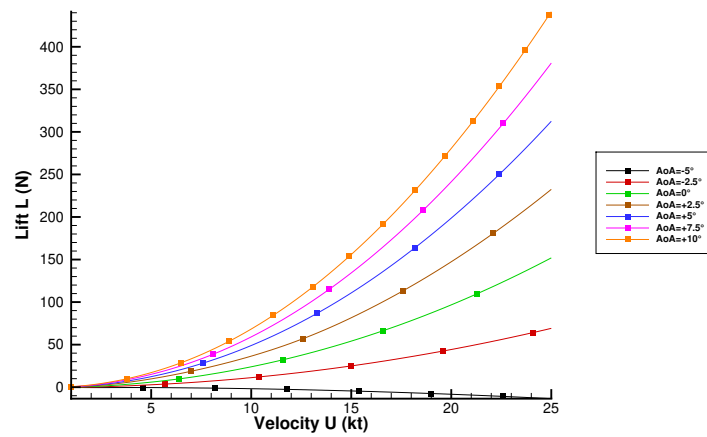


(c) Moment de tangage

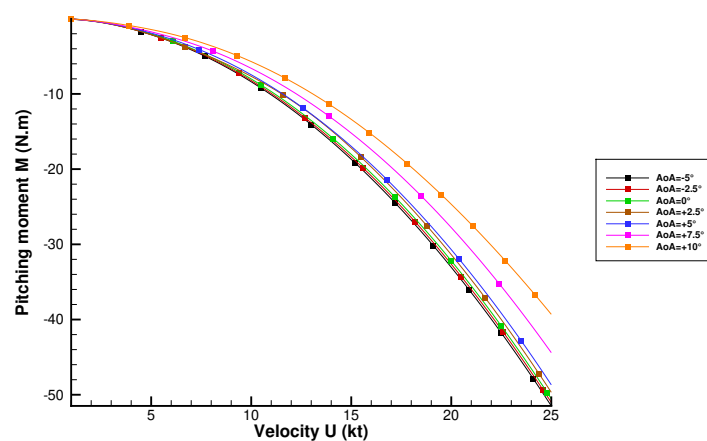
Fig. B.1 – Evolution des forces (a) de traînée et (b) de portance et (c) du moment de tangage en fonction de la vitesse du fluide U pour une aile droite de corde $c = 1,5$ m, d'envergure $s = 2$ m et pour l'ensemble des profils préselectionnés.



(a) Traînée

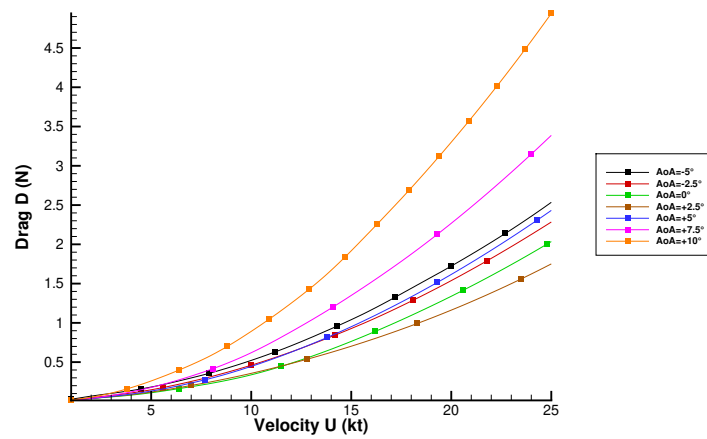


(b) Portance

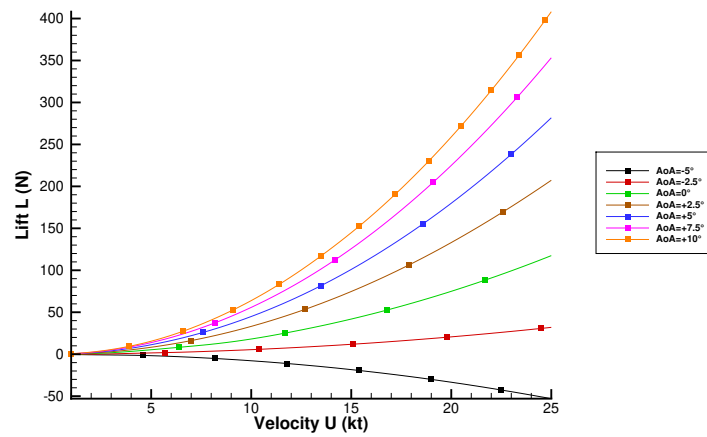


(c) Moment de tangage

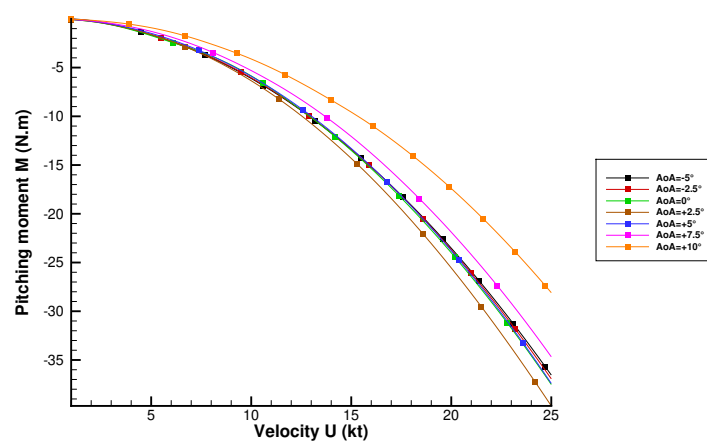
Fig. B.2 – Evolution des forces (a) de traînée et (b) de portance et (c) du moment de tangage en fonction de la vitesse du fluide U pour une aile droite de corde $c = 1,5$ m, d'envergure $s = 2$ m et générée par le profil NACA 4418.



(a) Traînée

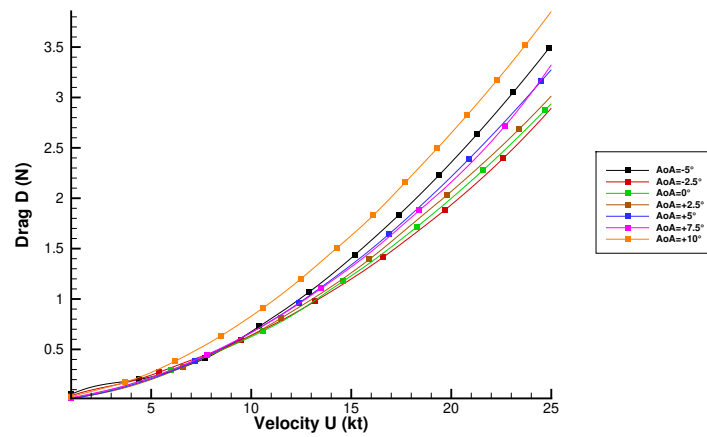


(b) Portance

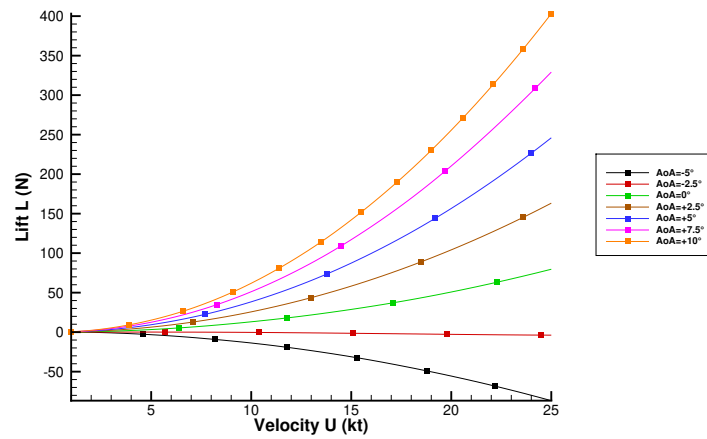


(c) Moment de tangage

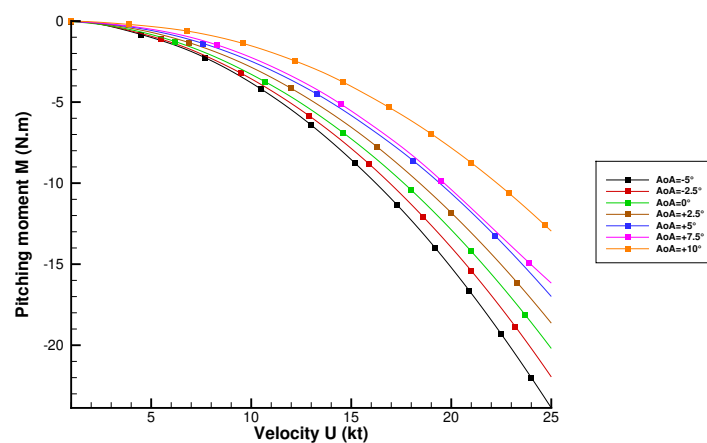
Fig. B.3 – Evolution des forces (a) de traînée et (b) de portance et (c) du moment de tangage en fonction de la vitesse du fluide U pour une aile droite de corde $c = 1,5$ m, d'envergure $s = 2$ m et générée par le profil Göttingen 693.



(a) Traînée

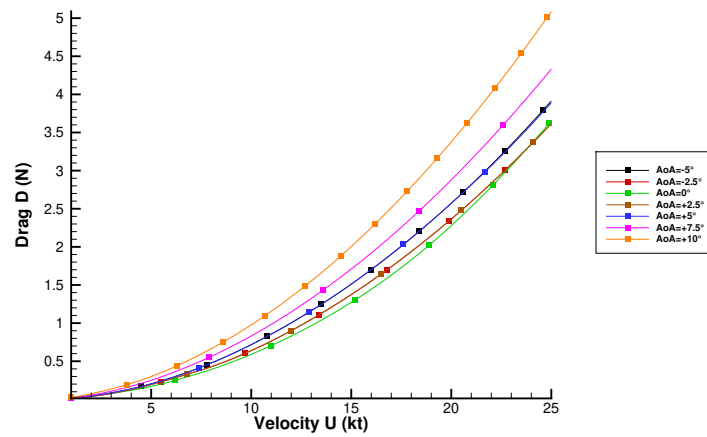


(b) Portance

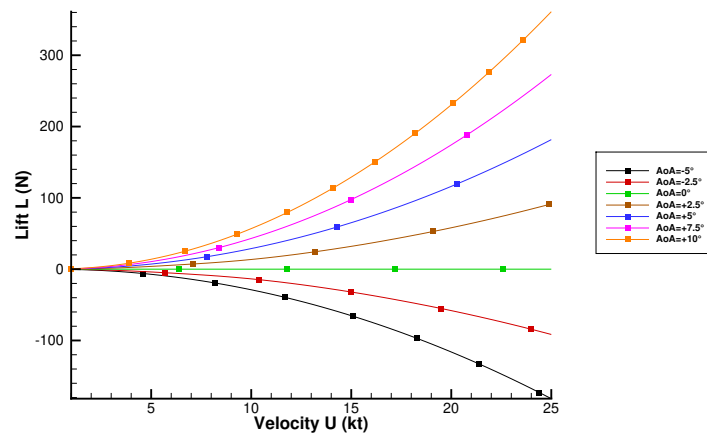


(c) Moment de tangage

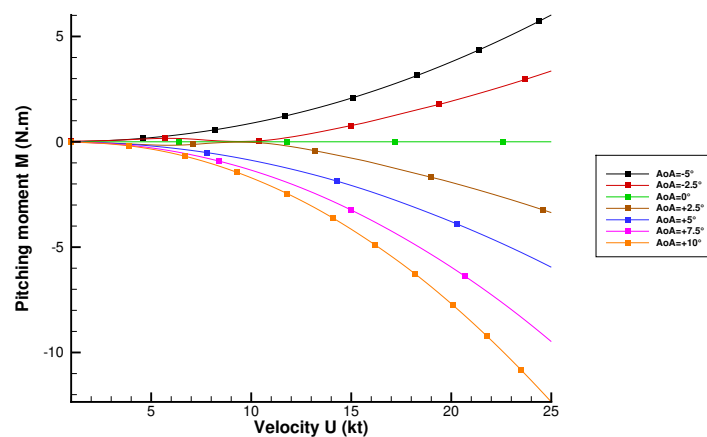
Fig. B.4 – Evolution des forces (a) de traînée et (b) de portance et (c) du moment de tangage en fonction de la vitesse du fluide U pour une aile droite de corde $c = 1,5$ m, d'envergure $s = 2$ m et générée par le profil FlexiBlade 4.9.



(a) Traînée



(b) Portance



(c) Moment de tangage

Fig. B.5 – Evolution des forces (a) de traînée et (b) de portance et (c) du moment de tangage en fonction de la vitesse du fluide U pour une aile droite de corde $c = 1,5$ m, d'envergure $s = 2$ m et générée par le profil Sputnik 4.

B.2 Les polaires sous forme graphiques

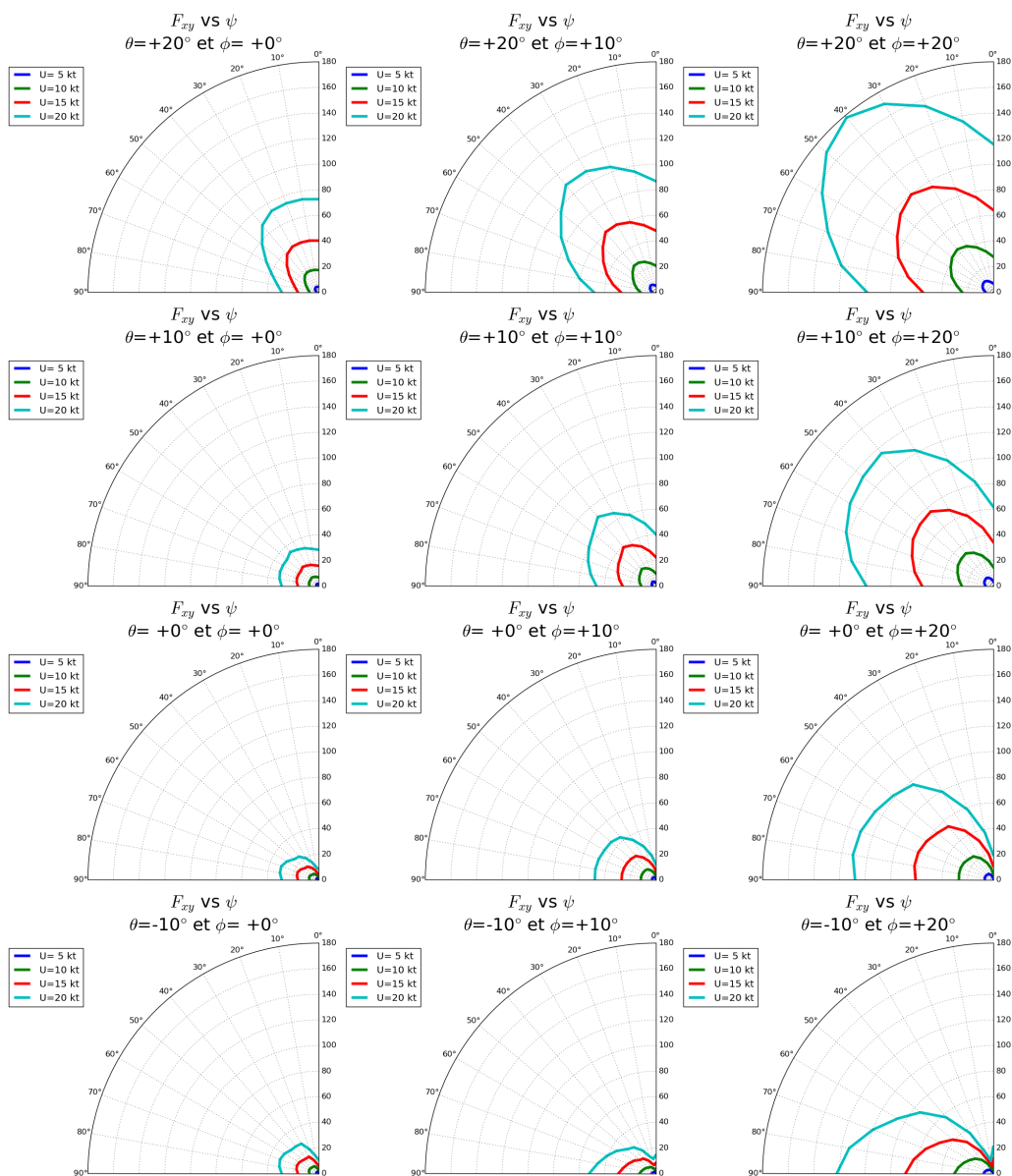


Fig. B.6 – Graphiques polaires affichant la norme F_{xy} de la composante horizontale de la résultante aérodynamique sur l'aile rigide en fonction de l'angle de lacet ψ , pour des valeurs fixées de l'angle de roulis ϕ et de tangage θ . De gauche à droite, ϕ croît de 0° à 20° . De bas à haut, θ croît de -10° à 20° .

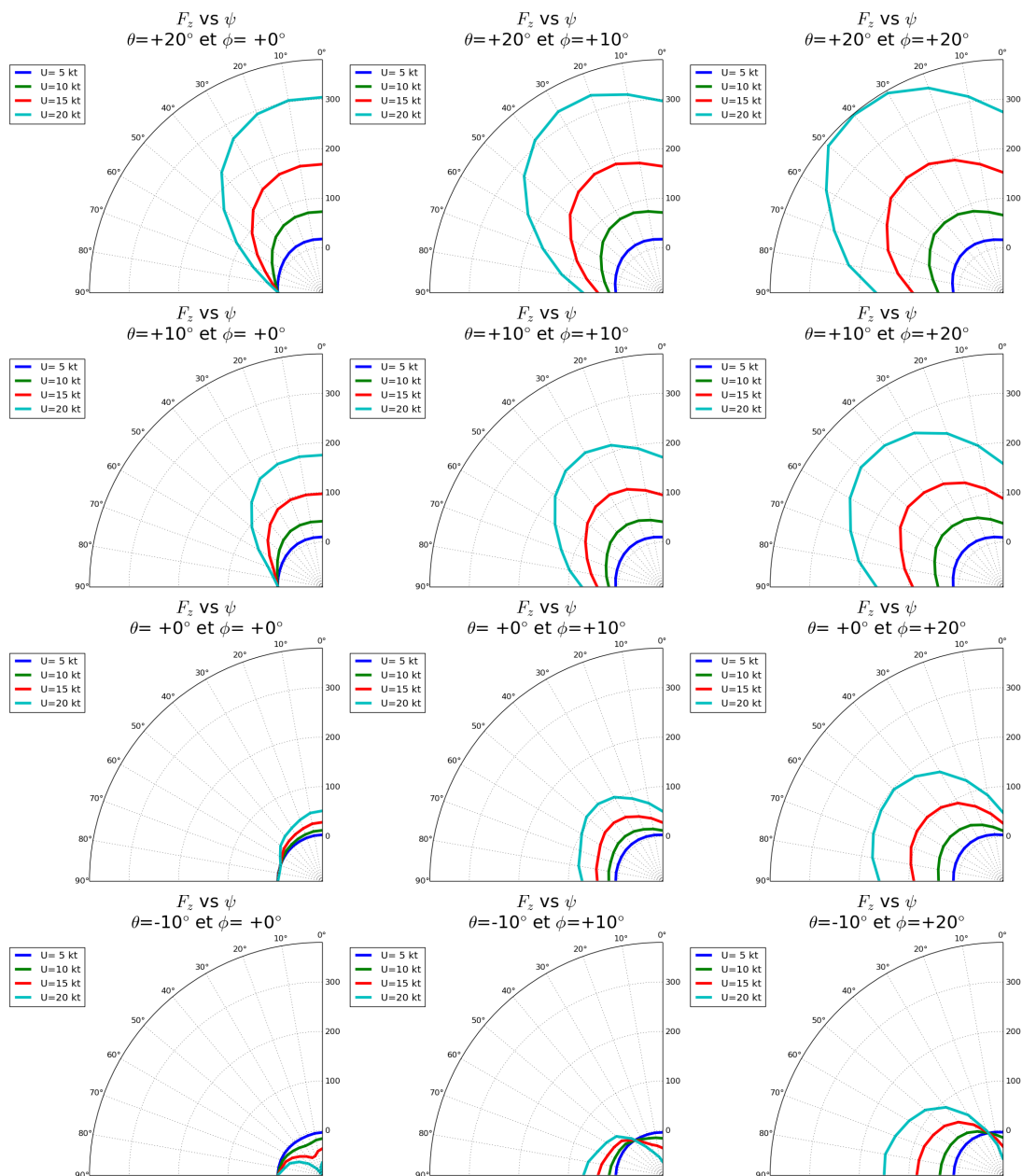


Fig. B.7 – Graphiques polaires affichant la composante verticale F_z de la résultante aérodynamique sur l'aile rigide en fonction de l'angle de lacet ψ , pour des valeurs fixées de l'angle de roulis ϕ et de tangage θ . De gauche à droite, ϕ croît de 0° à 20° . De bas à haut, θ croît de -10° à 20° .

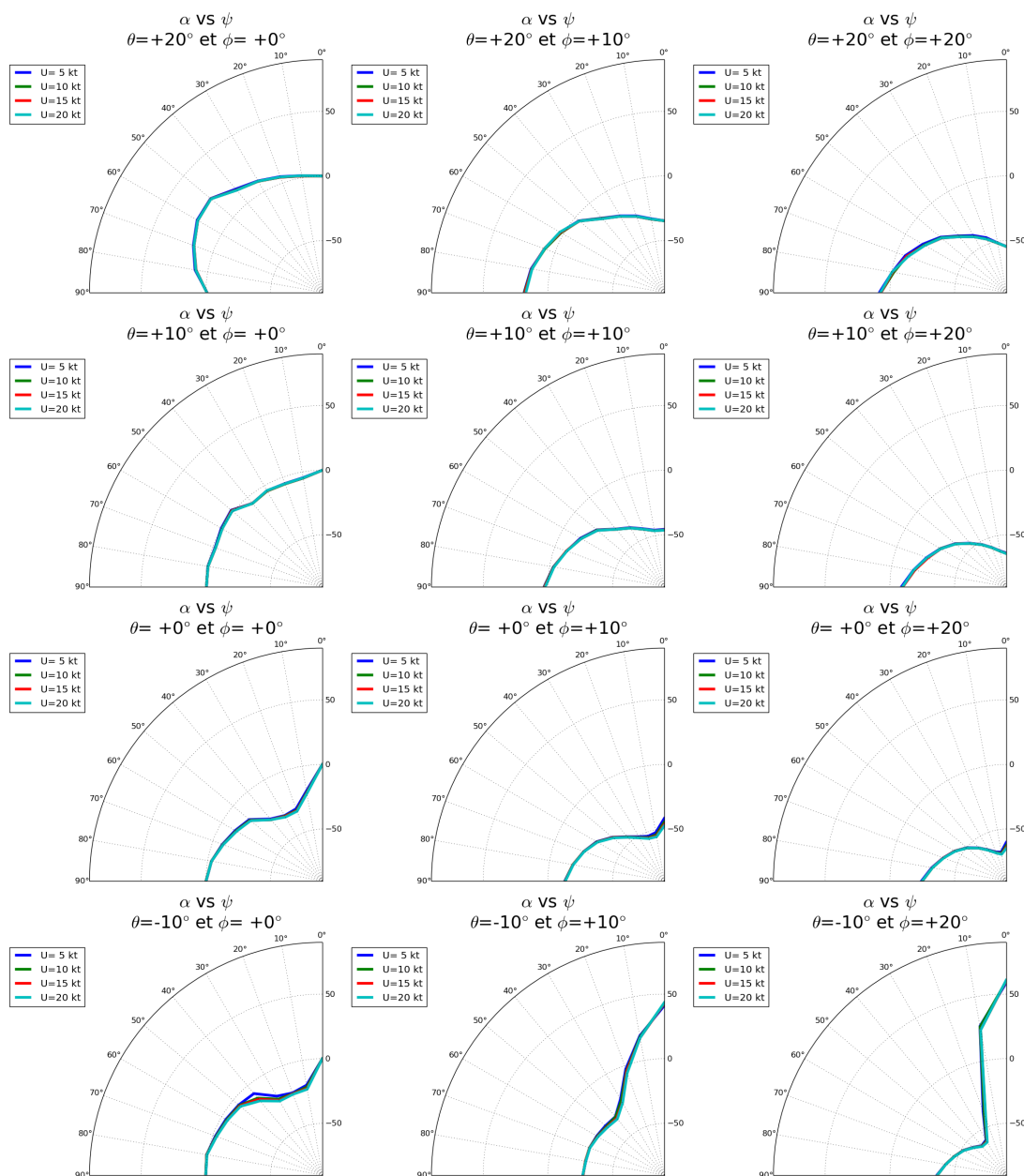


Fig. B.8 – Graphiques polaires affichant l'angle α entre le vecteur vitesse $\vec{U}$ et le vecteur $\vec{F}_{xy}$ de la composante horizontale de la résultante aérodynamique sur l'aile rigide en fonction de l'angle de lacet ψ , pour des valeurs fixées de l'angle de roulis ϕ et de tangage θ . De gauche à droite, ϕ croît de 0° à 20° . De bas à haut, θ croît de -10° à 20° .

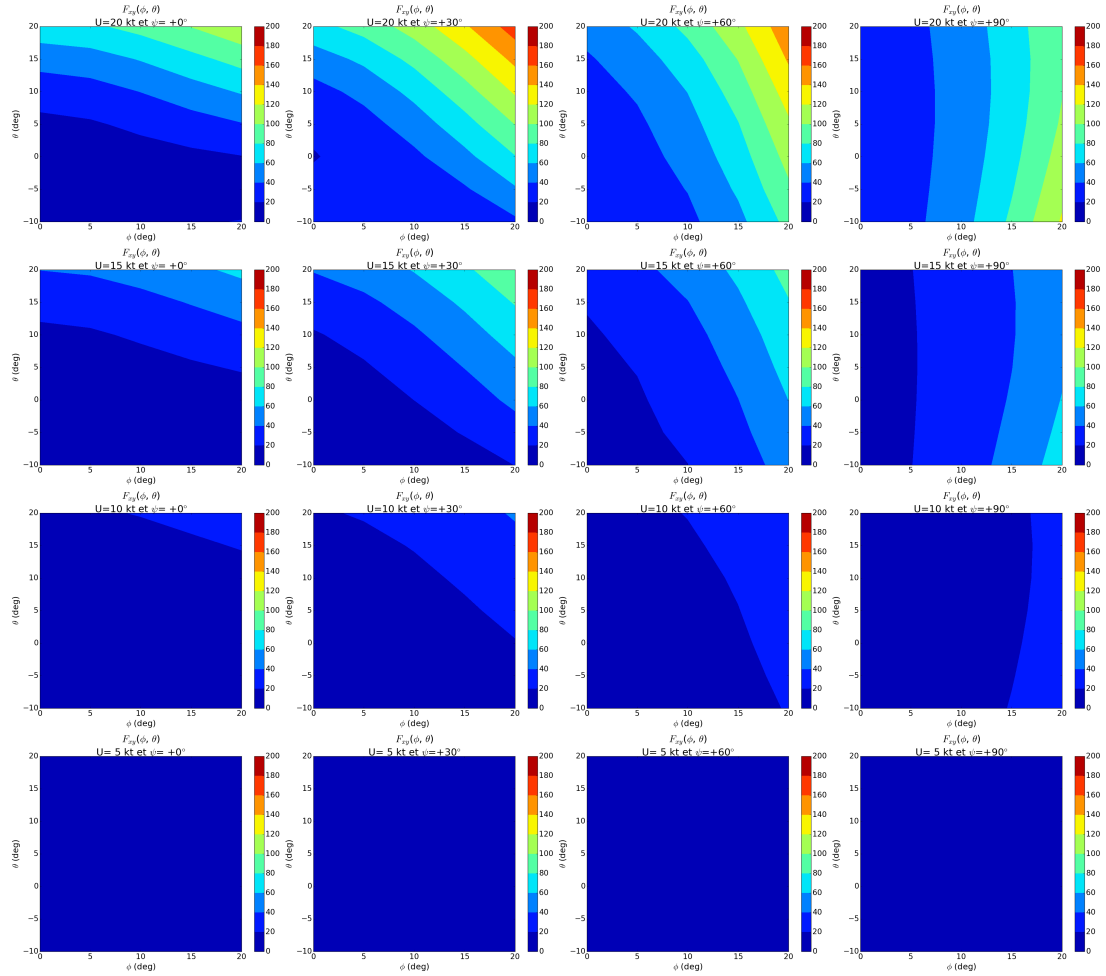


Fig. B.9 – Graphiques des courbes de niveaux de la norme F_{xy} de la composante horizontale de la résultante aérodynamique sur l'aile rigide en fonction des angles de roulis ϕ et de tangage θ , pour des valeurs fixées de la vitesse du vent U et de l'angle de lacet ψ . De bas en haut, U croît de $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ à $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. De gauche à droite, ψ croît de 0° à 90° .

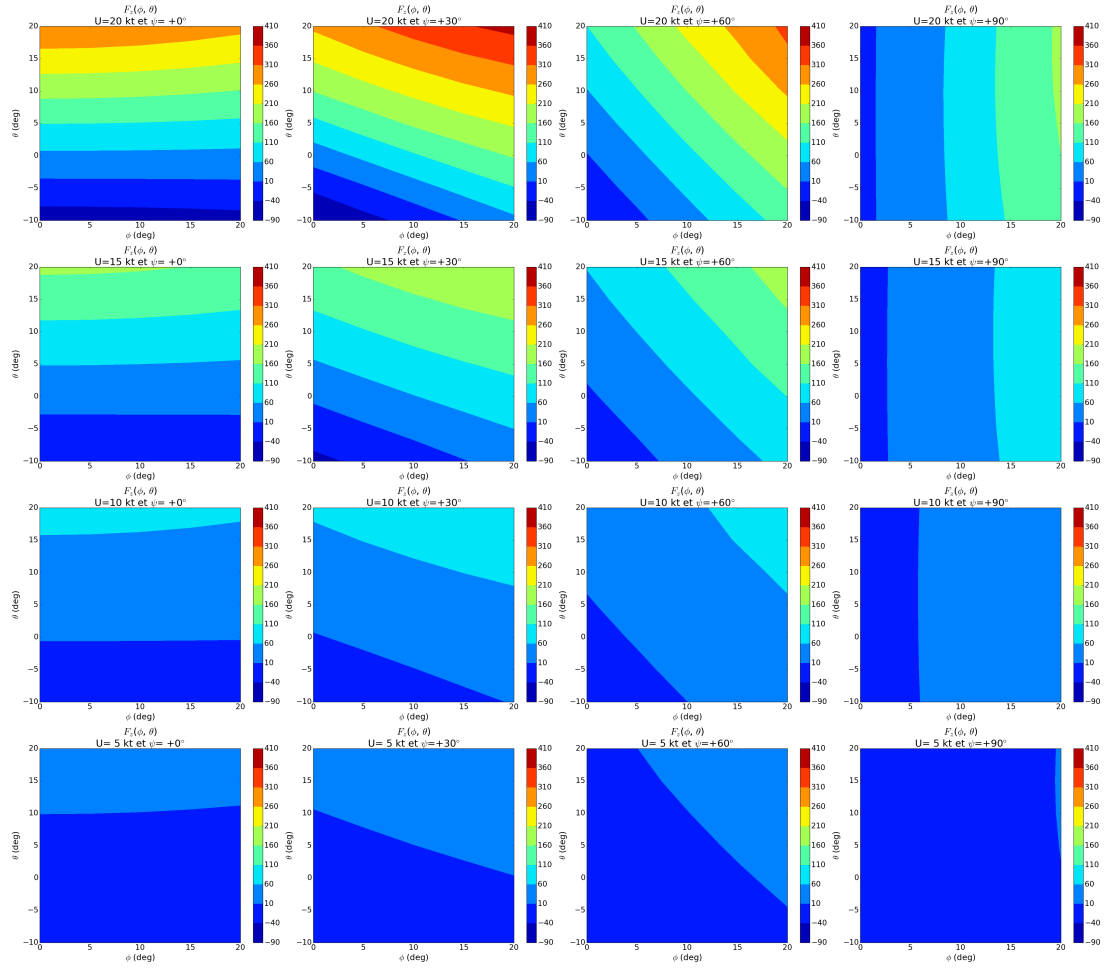
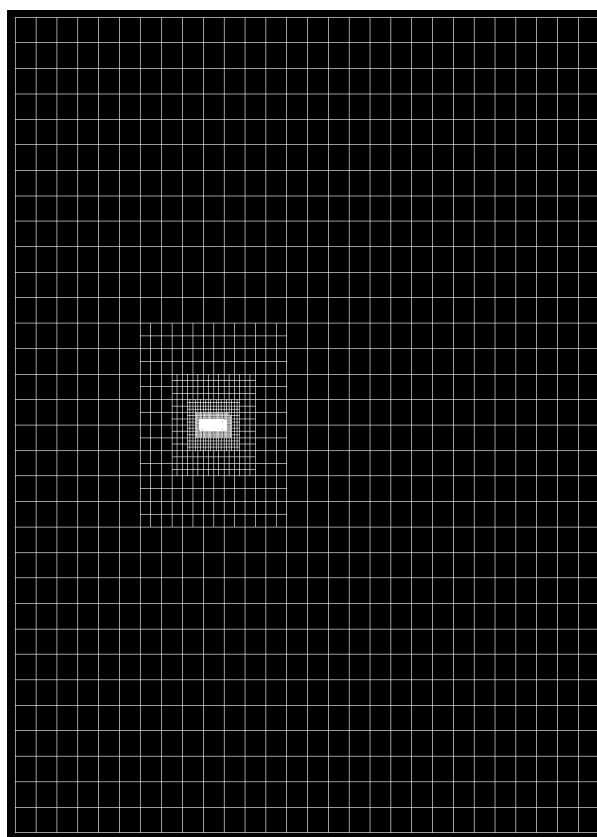
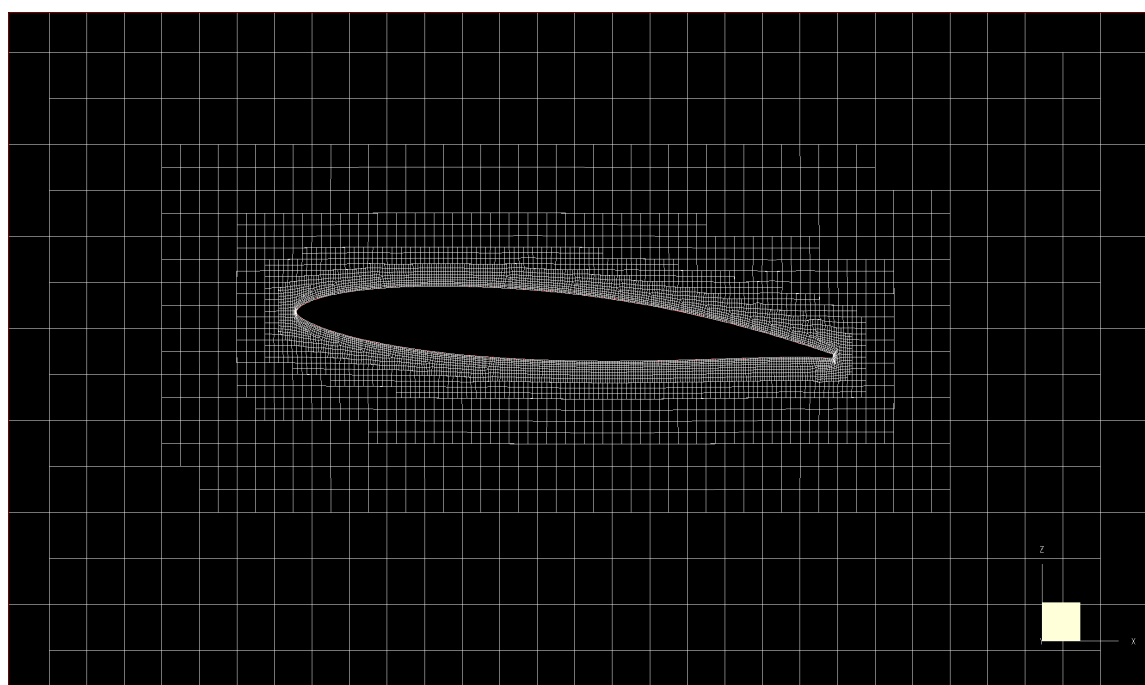


Fig. B.10 – Graphiques des courbes de niveaux de la composante verticale F_z de la résultante aérodynamique sur l'aile rigide en fonction des angles de roulis ϕ et de tangage θ , pour des valeurs fixées de la vitesse du vent U et de l'angle de lacet ψ . De bas en haut, U croît de $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ à $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. De gauche à droite, ψ croît de 0° à 90° .



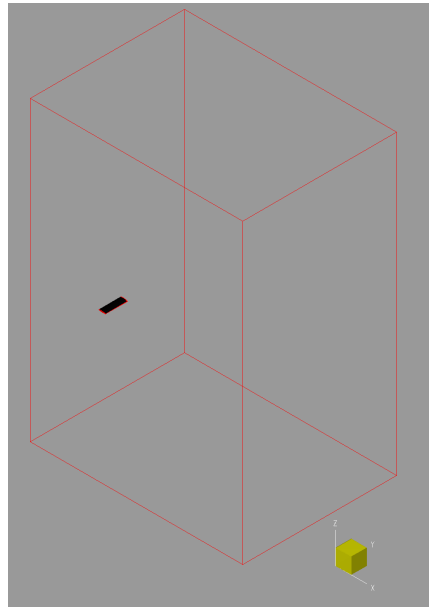
(a) Vue latérale, domaine entier



(b) Vue latérale, autour de l'hydrofoil

Fig. B.11 – Vues d'un exemple de maillage utilisé pour les simulations de l'écoulement autour d'un hydrofoil en monofluide (eau seulement).

B.3 Les maillages calcul hydrodynamique : 1 fluide, 1 foil



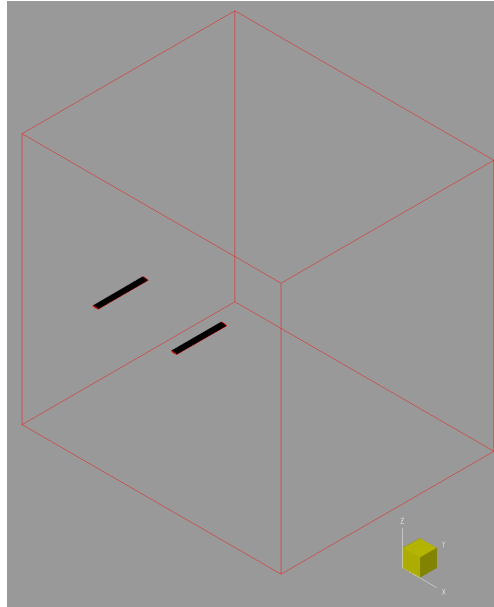
(a) Vue isométrique



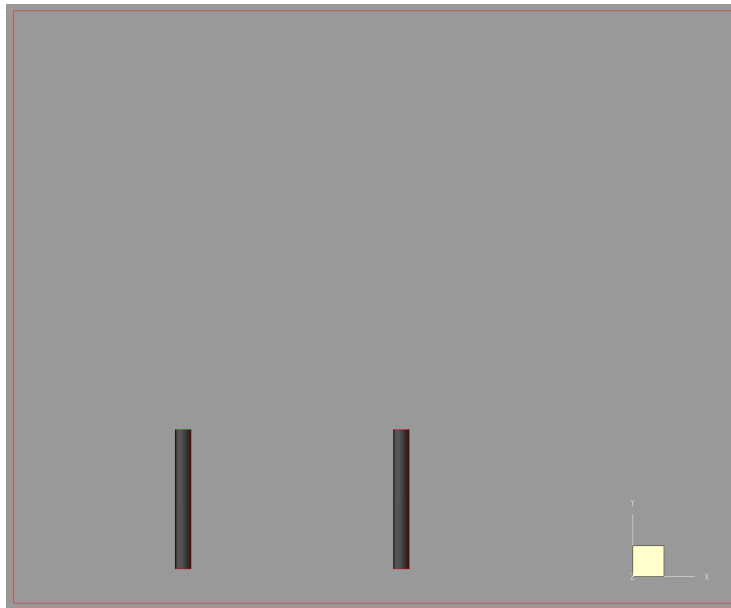
(b) Vue du dessus

Fig. B.12 – Vues d'un exemple de domaine de calcul utilisé pour les simulations de l'écoulement autour d'un hydrofoil en monofluide (eau seulement).

B.4 Les maillages calcul hydrodynamique : 1 fluide, 2 foils

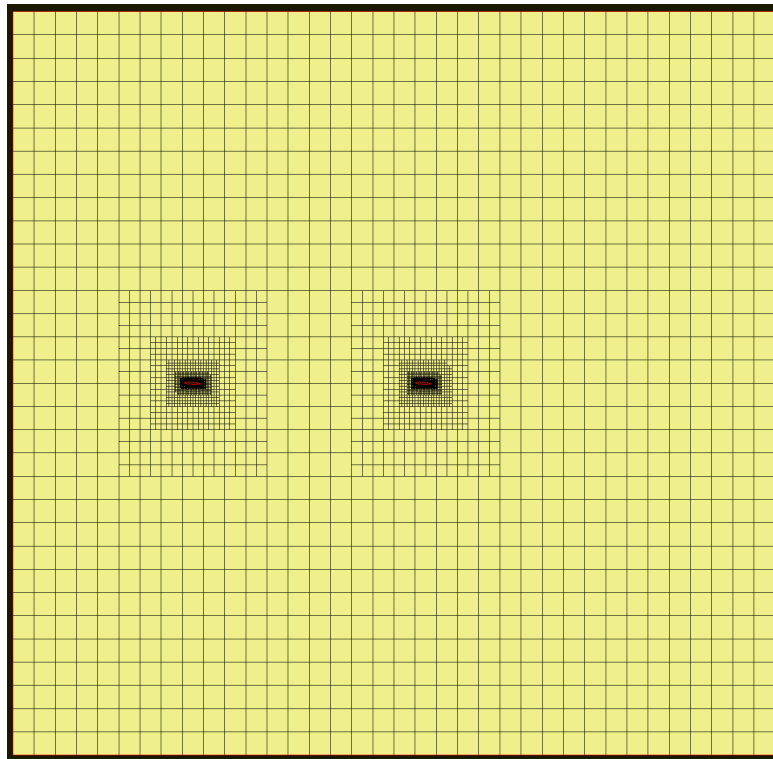


(a) Vue isométrique

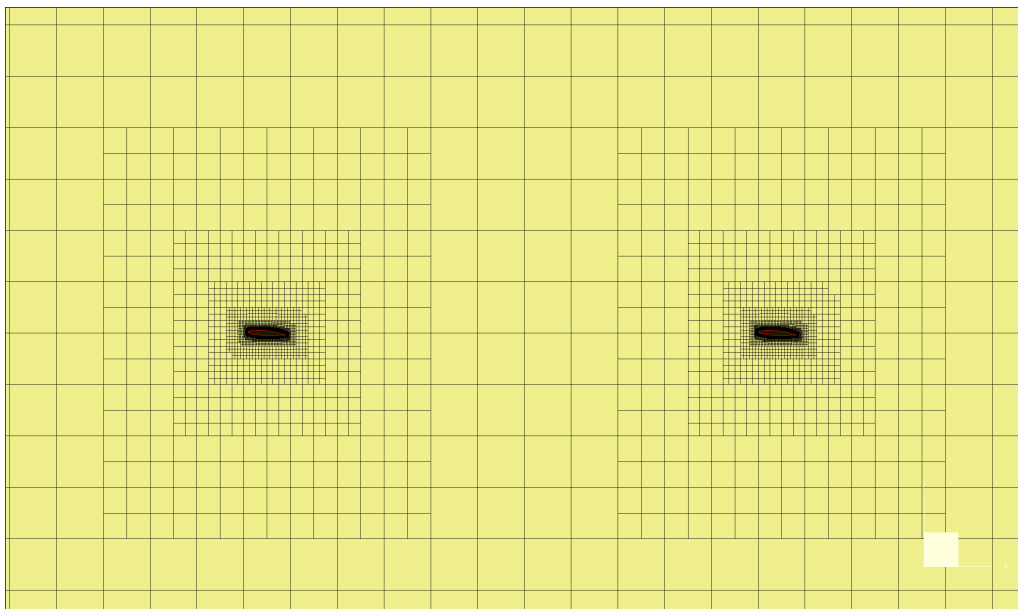


(b) Vue du dessus

Fig. B.13 – Vues d'un exemple de domaine de calcul utilisé pour les simulations de l'écoulement autour de deux hydrofoils en monofluide (eau seulement).



(a) Vue latérale, domaine entier



(b) Vue latérale, autour des hydrofoils

Fig. B.14 – Vues d'un exemple de maillage utilisé pour les simulations de l'écoulement autour de deux hydrofoils en monofluide (eau seulement).

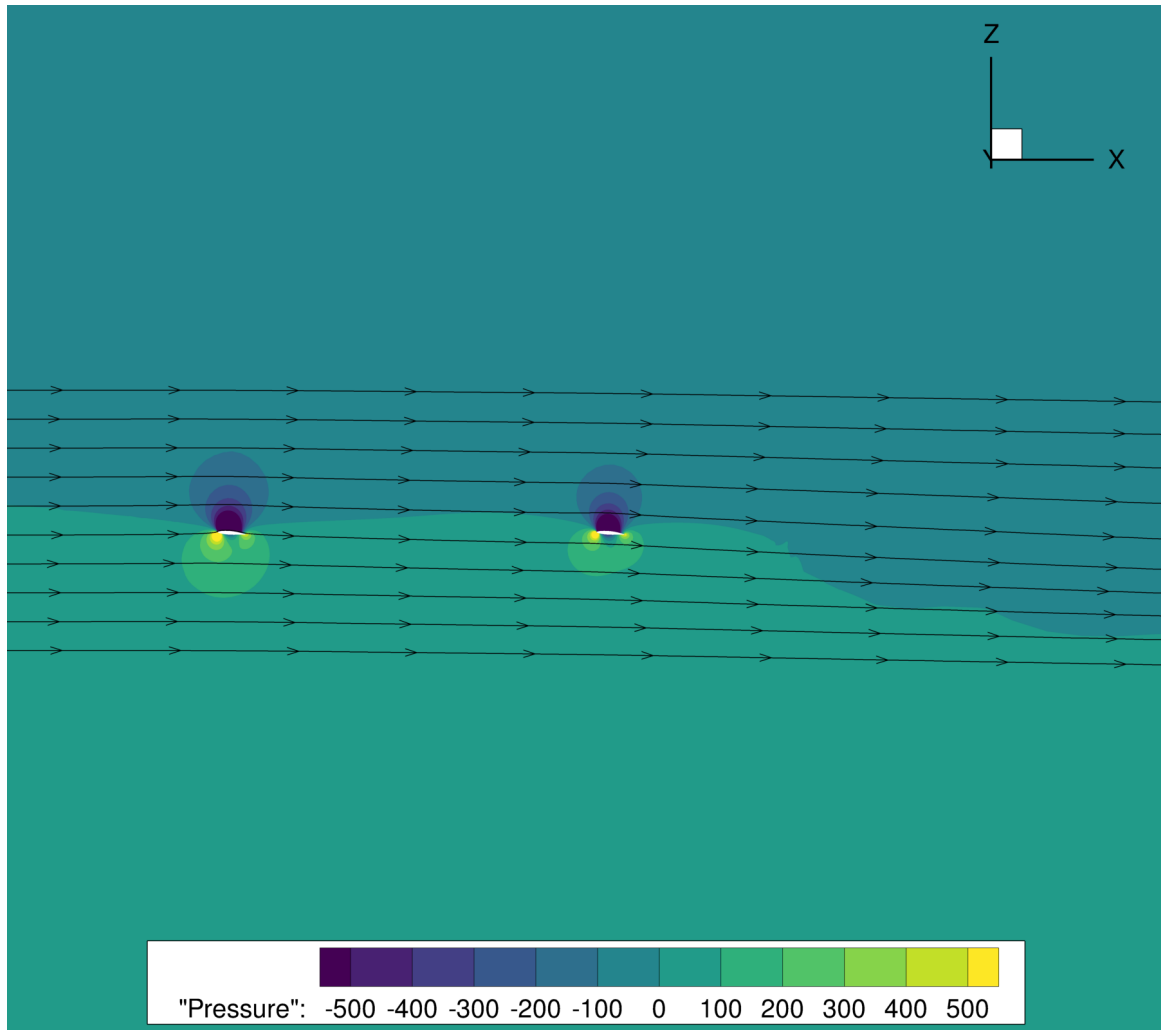
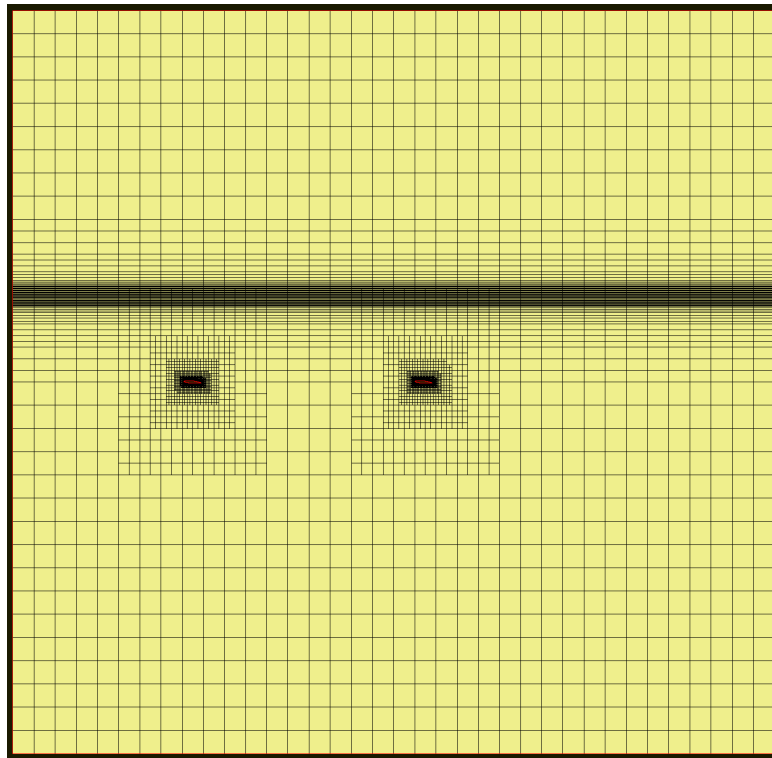
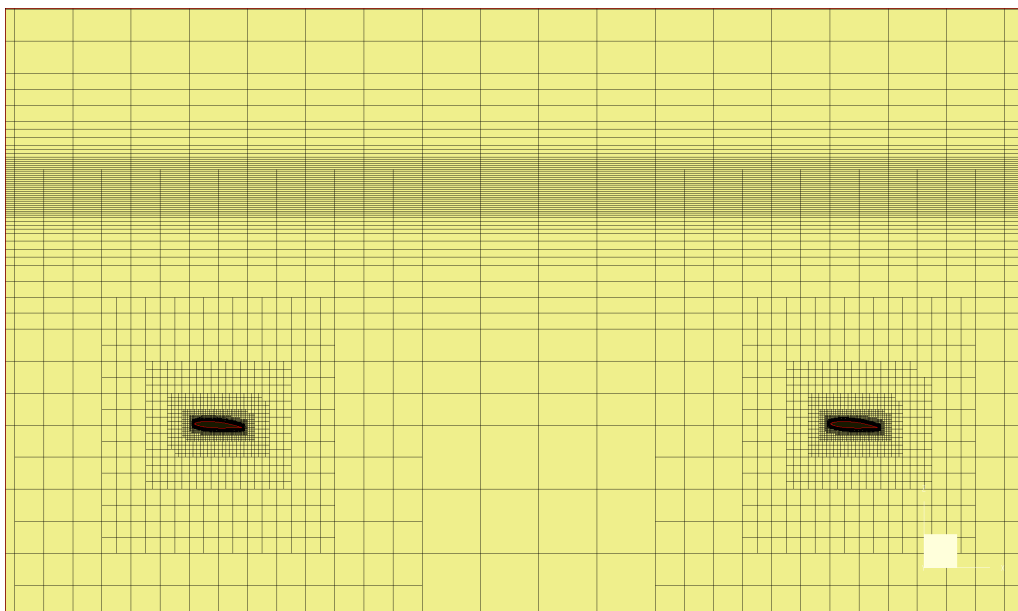


Fig. B.15 – Affichage de dix lignes de courant montrant l'écoulement (en monofluide) autour des deux hydrofoils et des lignes de niveaux de pressions saturées à ± 500 Pa.

B.5 Les maillages calcul hydrodynamique :2 fluides, 2 foils



(a) Vue latérale, domaine entier



(b) Vue latérale, autour des hydrofoils

Fig. B.16 – Vues d'un exemple de maillage utilisé pour les simulations de l'écoulement autour de deux hydrofoils avec prise en compte de la surface libre. Les hydrofoils sont immergées à une profondeur $h = 1,032$ m.

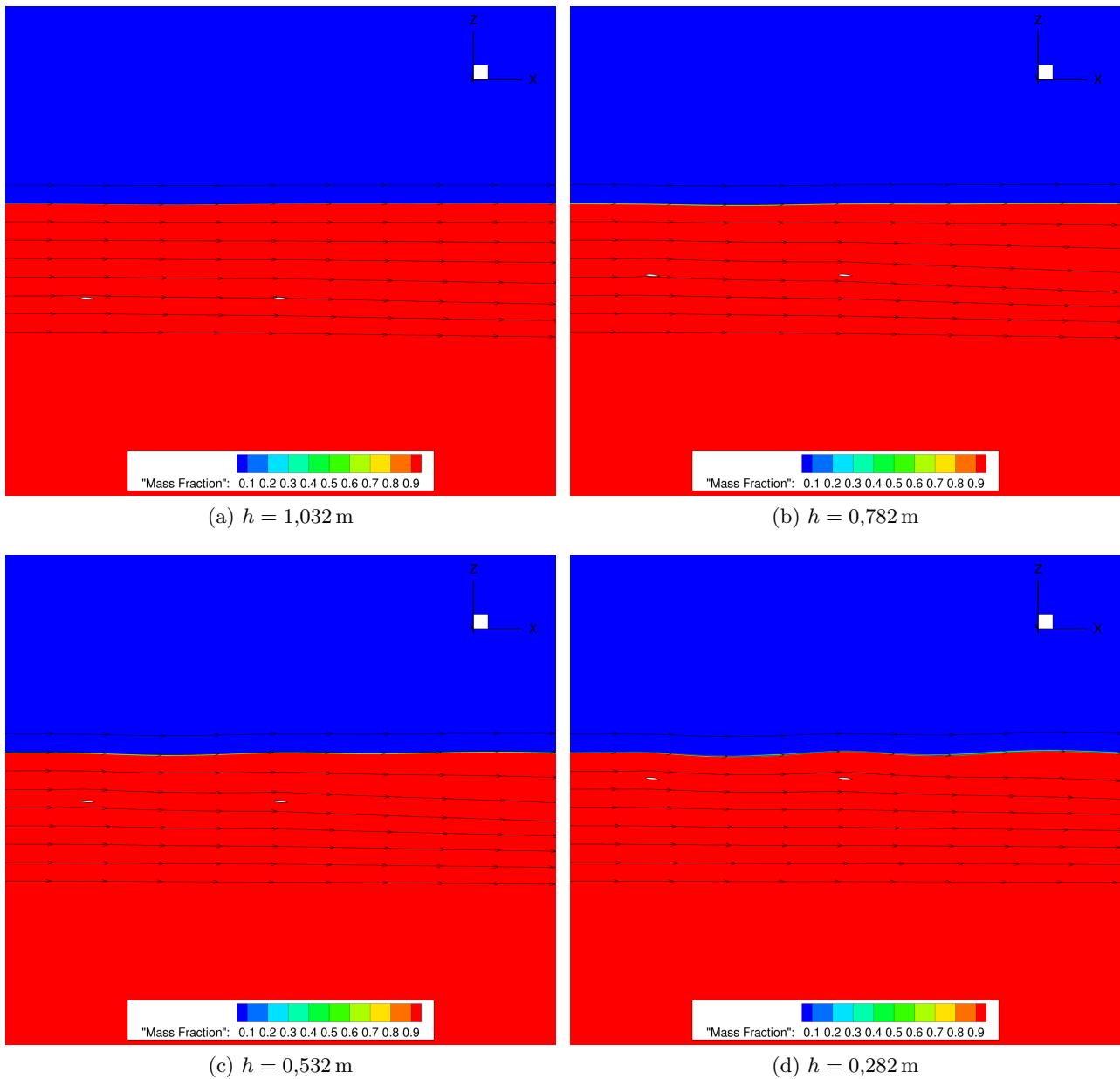
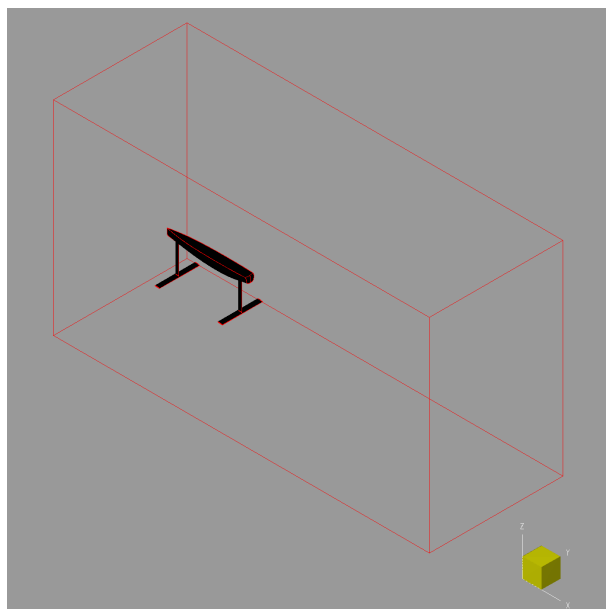
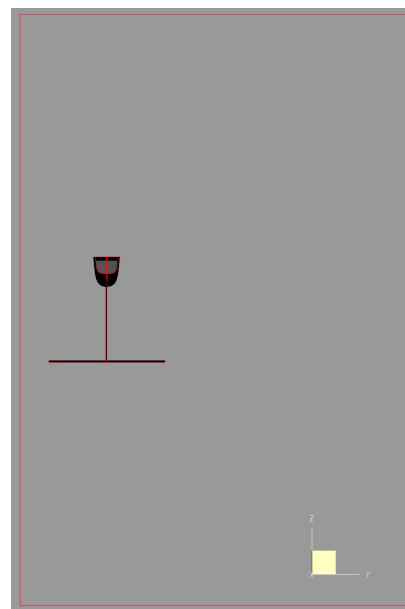


Fig. B.17 – Affichage de neuf lignes de courant montrant l'écoulement, prenant en compte la surface libre, autour des deux hydrofoils et des lignes de niveaux de fraction volumique en eau.

B.6 Les maillages pour les calculs hydrodynamiques : Catamaran , 2 fluides



(a) Vue isométrique



(b) Vue de derrière



(c) Vue latérale

Fig. B.18 – Vues du domaine de calcul utilisé pour la simulation de l'écoulement autour des parties immergées du demi-catamaran.

C - Annexes Lot4

C.1 Simulations de la plateforme à 4 foils

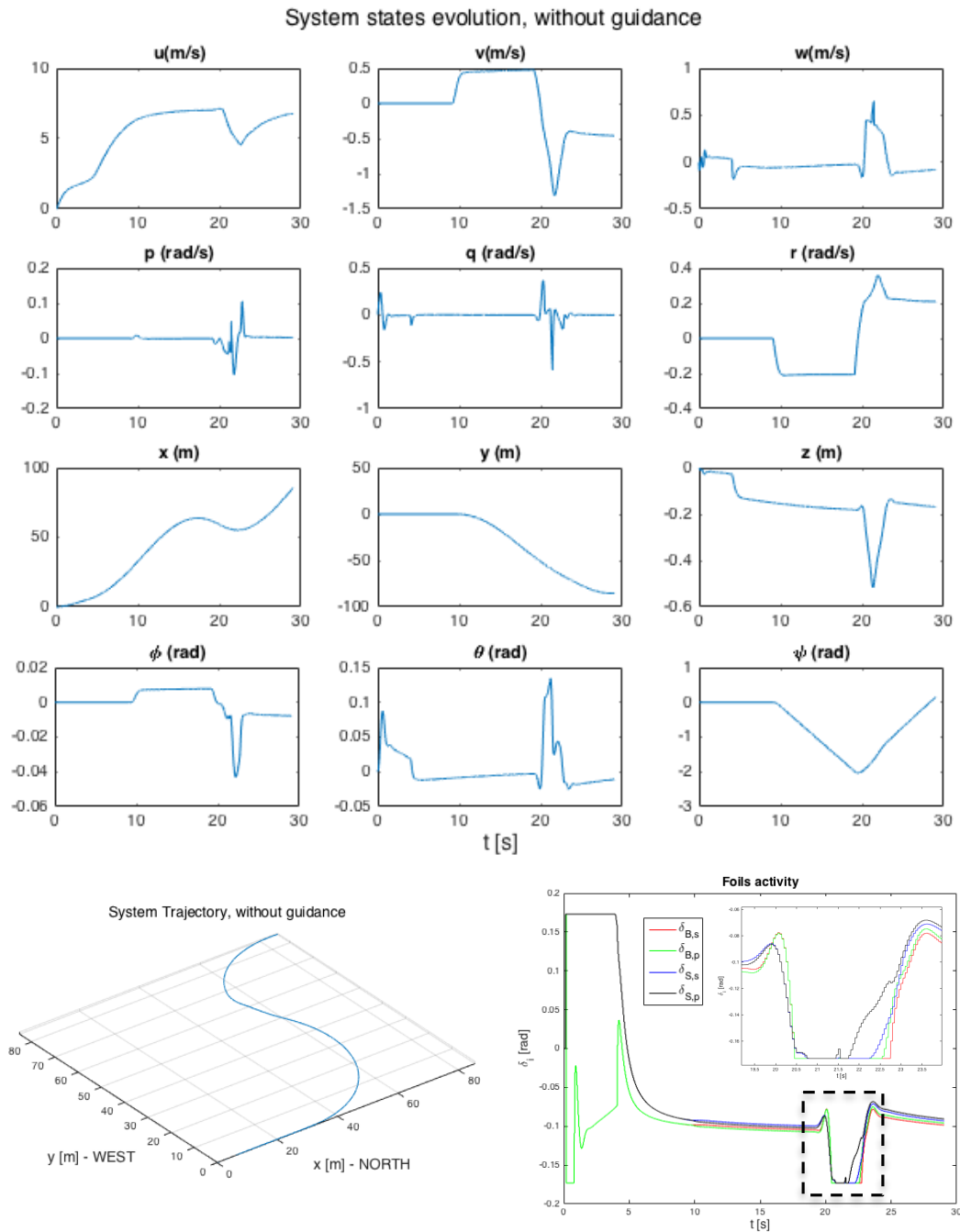


Fig. C.1 – Evolution de l'état du système (haut), trajectoire résultante (bas-gauche) et l'activité des foils (bas-droit), sans guidage

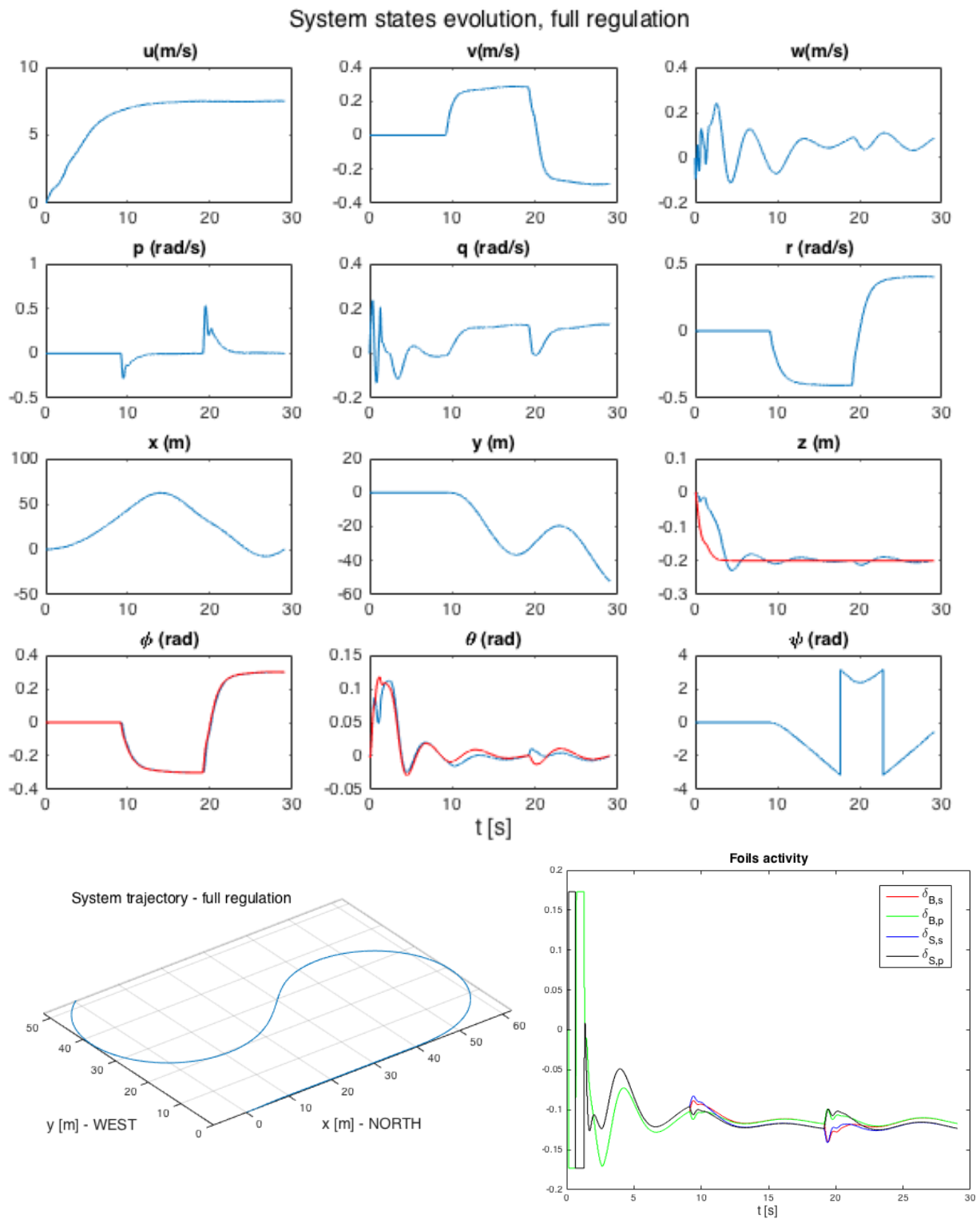


Fig. C.2 – Evolution de l'état du système (haut), trajectoire résultante (bas-gauche) et l'activité des foils (bas-droit), avec guidage

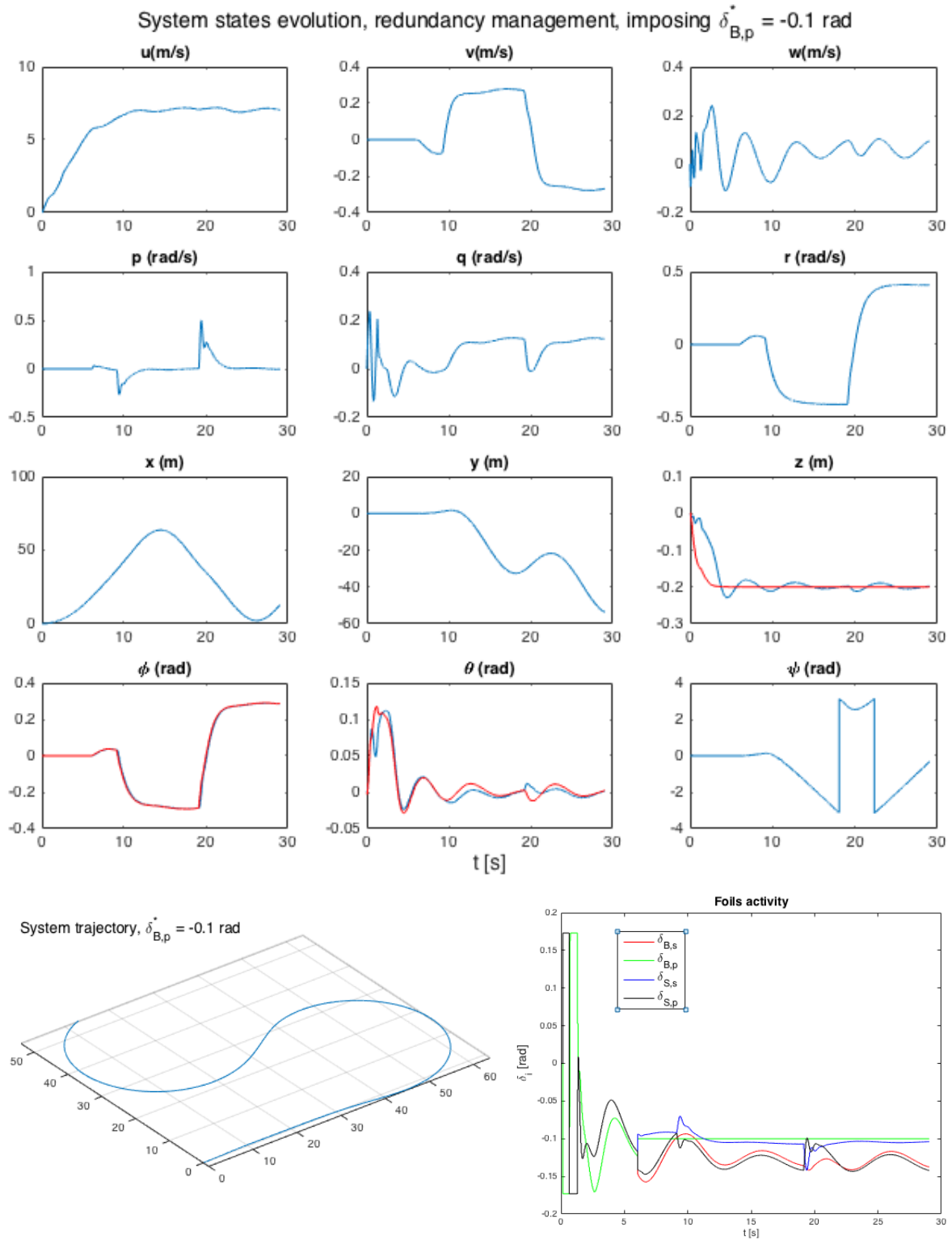


Fig. C.3 – Evolution de l'état du système (haut), trajectoire résultante (bas-gauche) et l'activité des foils (bas-droit), avec guidage, en imposant $\delta_{B,p} = -0.1 \text{ rad}$ à partir de $t = 6 \text{ s}$