



HAL
open science

Analyse, modélisation et optimisation d'un voilier hydro-éolien de production d'hydrogène

Gaël Clodic

► **To cite this version:**

Gaël Clodic. Analyse, modélisation et optimisation d'un voilier hydro-éolien de production d'hydrogène. Mécanique des fluides [physics.class-ph]. École centrale de Nantes, 2021. Français. NNT : 2021ECDN0023 . tel-03530282

HAL Id: tel-03530282

<https://theses.hal.science/tel-03530282>

Submitted on 17 Jan 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE DE DOCTORAT DE

L'ÉCOLE CENTRALE DE NANTES

ÉCOLE DOCTORALE N° 602
Sciences pour l'Ingénieur
Spécialité : *Mécanique des Milieux Fluides*

Par

Gaël CLODIC

Analyse, modélisation et optimisation d'un voilier hydro-éolien de production d'hydrogène

Thèse présentée et soutenue à l'École Centrale de Nantes, le 7 juin 2021

**Unité de recherche : UMR 6598, Laboratoire de recherche en hydrodynamique, énergétique et
environnement atmosphérique (LHEEA)**

Rapporteurs avant soutenance :

Christophe CORRE Professeur des universités, École Centrale de Lyon
Grégory PINON Maître de conférences HDR, Université du Havre

Composition du Jury :

Président :	Sylvain GUILLOU	Professeur des universités,	Université de Caen Normandie
Examineurs :	Pierre FERRANT	Professeur des universités,	École Centrale de Nantes
	Laëtitia PERNOD	Docteure,	IRENav, Brest

Dir. de thèse :	Aurélien BABARIT	Ingénieur de recherche HDR,	École Centrale de Nantes
-----------------	------------------	-----------------------------	--------------------------

Invité

Luc BODINEAU	Ingénieur,	ADEME, Angers
--------------	------------	---------------

Résumé de la thèse

Cette thèse porte sur un concept innovant pour la récupération de l'énergie du vent en mer : le voilier hydro-éolien. Dans ce concept, un navire avance grâce à une propulsion éolienne. Des hydrogénérateurs sont fixés sous la coque et produisent de l'électricité. L'électricité est convertie en hydrogène par électrolyse puis stockée à bord.

Le voilier hydro-éolien est constitué de nombreux sous-systèmes. Par une méthode d'ingénierie système, la première partie de la thèse propose un outil d'aide à la décision pour le choix des composants technologiques. Une étude de cas sur le choix du système de propulsion éolien du voilier-hydrolienne est réalisée. Parmi cinq technologies de propulsion éolienne (voiles souples et rigides, rotors Flettner, turbo-voiles, ailes de kite), les rotors Flettner sont sélectionnés.

Dans la seconde partie une modélisation numérique du navire en conditions quasi-statiques est réalisée. La modélisation s'appuie sur la résolution de l'équation du mouvement du navire et par la méthode des écoulements potentiels pour la partie hydrodynamique. L'étude montre qu'un navire de type catamaran de longueur 80 m produit 1 MW électrique dans un vent de travers de 10 m/s. Cela correspond à 2,9 tonnes d'hydrogène par semaine. La puissance nominale (1,73 MW) est atteinte pour une vitesse de vent de 12 m/s.

Dans la dernière partie, une optimisation de la forme de coque est réalisée avec un algorithme génétique NSGA II afin d'augmenter la puissance produite. Elle porte sur des carènes de catamarans symétriques ou non (navires de type prao). Cette étude montre que les formes non-symétriques sont plus performantes. Il est obtenu une puissance produite jusqu'à 12% supérieure à celles obtenues précédemment (soit 3,3 tonnes d'hydrogène par semaine).

Mots clés : Voilier hydro-éolien, hydrogène, énergie éolienne, énergies marines renouvelables, rotors Flettner, modélisation, optimisation

Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier Aurélien BABARIT, ingénieur de recherche HDR à l'École Centrale de Nantes et Jean-Christophe GILLOTEAUX, ingénieur de recherche à l'École Centrale de Nantes, pour leur encadrement de qualité et leur soutien permanent à mes travaux de thèse.

Je remercie mes rapporteurs Christophe CORRE, professeur des universités à l'École Centrale de Lyon, et Grégory PINON, maître de conférences HDR à l'Université du Havre, d'avoir pris le temps de relire mon manuscrit et de m'avoir fait part de leurs remarques constructives et pertinentes.

J'adresse tous mes remerciements à Sylvain GUILLOU, professeur des universités à l'Université de Caen Normandie, ainsi qu'à Pierre FERRANT, professeur des universités à l'École Centrale de Nantes, et à Laëtitia PERNOD, Docteure à IRENav Brest, de l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'être rapporteurs de cette thèse.

Je remercie l'ADEME et plus particulièrement Luc BODINEAU pour l'intérêt porté sur mes travaux et pour m'avoir accordé la confiance nécessaire à la réalisation de cette thèse. Je remercie également au sein de l'ADEME la cellule thèse (Valérie PINEAU, Maguy FAVRELIÈRE et Eric PLOTTU) qui soutiennent et encouragent les doctorants de l'ADEME tout au long de l'année.

Je remercie chaleureusement l'ensemble des membres du laboratoire LHEEA de l'École Centrale de Nantes, pour leur aide quotidienne, leur sympathie et leurs réponses à mes nombreuses questions.

Enfin j'adresse un dernier remerciement à Émilie PETITEAU pour sa participation aux nombreuses relectures de ce manuscrit ainsi que son écoute attentive de mes répétitions de soutenance.

Notations

Constantes :

m	Masse du navire
g	Constante gravitationnelle
ρ_W	Masse volumique de l'eau
ρ_{air}	masse volumique de l'air
Re	Nombre de Reynolds
Fr	Nombre de Froude
λ	Longueur d'onde

Descriptions des forces :

\vec{B}_{tri}	Poussée d'Archimède (coque tribord)
\vec{B}_{bab}	Poussée d'Archimède (coque bâbord)
\vec{M}_A	Moment du à la poussée d'Archimède
\vec{R}_H	Résistance à l'avancement de l'hydrogénérateur
\vec{R}_W	Résistance à l'avancement de la carène
\vec{F}_{aero}	Résultante aérodynamique
\vec{P}	Poids du navire
\vec{M}_P	Moment du au poids
\vec{F}_{prop}	Force propulsive
\vec{F}_{der}	Force de dérive
\vec{F}_L	Portance des rotors
\vec{F}_D	Traînée des rotors
\vec{M}_r	Moment de redressement
\vec{M}_{chav}	Moment de chavirement

Comportement du navire :

U	Vitesse d'avance
E	Enfoncement
ϕ	Angle de gîte

Description du vent :

U_{TW}	Vecteur de vent réel
TWA	Angle du vent réel ("True Wind Angle")
TWS	Vitesse du vent réel ("True Wind Speed")
U_{AW}	Vecteur de vent apparent
AWA	Angle du vent apparent ("Apparent Wind Angle")
AWS	Vitesse du vent apparent ("Apparent Wind speed")
U_{ref}	Vitesse du vent réel à la hauteur de référence
z_{ref}	Hauteur de référence du vent

Description des rotors Flettner :

A_r	Surface portante
D	Diamètre du cylindre
D_e	Diamètre du disque supérieur
k_A	Rapport d'aspect
k_D	Rapport de disque
k_v	Rapport de vitesse
ω	Vitesse de rotation
C_L	Coefficient de portance
C_D	Coefficient de traînée
z_C	Hauteur du centre vélique
P_{rotors}	Puissance électrique consommée

Description de l'hydrogénérateur :

S_H	Surface balayée
a	Facteur d'induction
η	Rendement
P_H	Puissance électrique produite
P_{net}	Puissance électrique nette

Caractéristiques du maillage :

$ALAV$	Distance maillée en amont de la carène
$ALAR$	Distance maillée libre en aval de la carène
$ALCE$	Distance maillée libre sur les cotés de la carène
δ_{SN}	Erreur numérique totale
δ_I	Erreur due au nombre d'itérations
δ_G	Erreur due au maillage
δ_T	Erreur due au pas de temps
δ_P	Erreur due aux autres paramètres

Description de la carène :

L	Longueur de référence
L_{tri}	Longueur de la coque tribord
L_{bab}	Longueur de la coque bâbord
B_{tri}	Largeur de la coque tribord
B_{bab}	Largeur de la coque bâbord
D_{tri}	Profondeur de la coque tribord
D_{bab}	Profondeur de la coque bâbord
$Inter$	Écartement
Δ_z	Hauteur de la coque bâbord
S_W	Surface mouillée
k	Facteur de forme
C_f	Coefficient de résistance visqueuse
C_r	Coefficient de résistance résiduelle
C_t	Coefficient de résistance total
V	Volume immergé total
V_{tri}	Volume immergé de la coque tribord
V_{bab}	volume immergé de la coque bâbord
R_V	Rapport de volume
$F_{L,d}$	Portance des plans anti-dérive
$A_{R,d}$	Surface portante des plans anti-dérive
$C_{L,d}$	Coefficient de portance des plans anti-dérive

Table des matières

Résumé de la thèse	2
Remerciements	3
Notations	4
Introduction	14
i Un système de production d'énergie en haute mer	14
i.i La nécessité d'une nouvelle alternative de production d'énergie	14
i.ii Le voilier hydro-éolien de production d'énergie	16
i.iii Du navire au système de production d'énergie	20
ii Problématiques abordées	21
iii Contenu du manuscrit	22
I Choix technologiques des composants du navire	23
I.1 Méthodes	23
I.1.1 Description du système étudié	23
I.1.1.1 Mission du système	24
I.1.1.2 Description des sous-systèmes	25
I.1.1.3 Cycle de vie du système	25
I.1.2 Identification des acteurs du projet	29
I.1.3 Fonctions et besoins des acteurs du projet	31
I.1.4 Exigences pour un projet Farwind viable	31
I.2 Étude de cas : choix technologique du système de propulsion éolien	34
I.2.1 Méthodes de l'étude de cas	35
I.2.1.1 Indicateurs de performance	35
I.2.1.2 Évaluation des indicateurs de performance	38
I.2.1.3 Détail des calculs réalisés	38
I.2.2 Résultats	42
I.2.2.1 Voiles souples	42
I.2.2.2 Voiles rigides	47
I.2.2.3 Ailes de kite	51
I.2.2.4 Rotors Flettner	56
I.2.2.5 Turbovoiles	60
I.2.3 Conclusion de l'étude de cas	64
I.3 Conclusion du chapitre	66
II Modèle du navire	67
II.1 Méthodes	67

II.1.1	Équation du mouvement	67
II.1.2	Efforts aérodynamiques	70
II.1.2.1	Description des rotors Flettner	70
II.1.2.2	Calcul de la force propulsive	71
II.1.2.3	Calcul de la hauteur du centre vélique	73
II.1.3	Efforts hydrodynamiques	75
II.1.3.1	Modélisation des hydrogénérateurs	75
II.1.3.2	Géométrie de la carène	76
II.1.3.3	Calcul de la résistance à l'avancement de la carène	77
II.1.4	Calcul de la puissance nette	87
II.2	Implémentation	88
II.2.1	Stratégie de calcul	88
II.2.2	Calcul des surfaces de réponse	89
II.2.3	Calcul de la puissance produite	89
II.2.4	Choix du point de fonctionnement optimal	91
II.3	Étude de cas	92
II.3.1	Définition du navire	92
II.3.1.1	Description générale	92
II.3.1.2	Description de la chaîne énergétique	93
II.3.1.3	Évaluation de la masse du navire	94
II.3.1.4	Choix de la carène	95
II.3.1.5	Résumé du navire	96
II.3.2	Résultats	97
II.3.2.1	Courbes polaires de puissance et de vitesse	97
II.3.2.2	Équilibre des forces	102
II.3.2.3	Conclusion de l'étude de cas	103
III	Optimisation de la forme de carène	104
III.1	Méthodes et implémentation	105
III.1.1	Algorithme d'optimisation	105
III.1.2	Évolution du modèle pour l'optimisation	107
III.1.3	Paramètres à optimiser	108
III.1.4	Spécificités des carènes non-symétriques	109
III.1.5	Gestion des contraintes	111
III.1.6	Implémentation complète	112
III.2	Étude de cas	113
III.2.1	Configuration de l'étude de cas	113
III.2.1.1	Configuration générale	113
III.2.1.2	Plages de variation des paramètres	113
III.2.1.3	Contraintes appliquées	114
III.2.1.4	Nombre et taille des générations	115
III.2.2	Remarques générales sur les résultats	116
III.2.2.1	Résultat de référence	116
III.2.2.2	Temps de calcul	116
III.2.2.3	Erreurs rencontrées	117
III.2.3	Résultats de l'optimisation en configuration symétrique	118
III.2.3.1	Évaluation de la puissance nette	118
III.2.3.2	Exemples d'individus générés	120
III.2.3.3	Description du meilleur individu	120
III.2.4	Résultat de l'optimisation en configuration libre	123

III.2.4.1	Évaluation de la puissance nette	124
III.2.4.2	Dispersion des résultats	125
III.2.4.3	Exemples d'individus générés	127
III.2.4.4	Description du meilleur individu	128
III.2.5	Interprétation des résultats	132
III.2.5.1	Répartition des volumes immergés	132
III.2.5.2	Caractérisation des carènes	134
III.2.5.3	Bilan énergétique du navire	136
III.3	Conclusion du chapitre	138
	Conclusion	141
	Choix technologiques des composants du navire	141
	Modélisation du navire	142
	Optimisation de la forme de carène	144
	Perspectives générales	146
	Annexe A : tableau des fonctions et besoins des acteurs du projet	156

Table des figures

.1	Principales différences entre des systèmes de production éolien à terre, sur la côte et en haute mer	15
.2	Répartitions des vitesses de vent moyennes sur la période 1979-2013	16
.3	Schéma des sous-systèmes du voilier hydro-éolien	17
.4	Propositions de voilier hydro-éolien de production d'énergie	17
.5	Caractéristiques des types de stockage de l'énergie	18
.6	Ferme éolienne mobile	19
.7	Fonctionnement du système de production d'énergie en haute mer	20
I.1	Description des sous-systèmes et sous-sous-systèmes d'un système Farwind	24
I.2	Étapes du cycle de vie d'un projet Farwind	25
I.3	Liste des acteurs agissant dans et autour d'un système Farwind	30
I.4	Arbre des exigences pour un projet Farwind viable	33
I.5	Fonctions remplies par le sous-système "propulsion éolienne" au sein du système "navire de production"	34
I.6	Technologies de propulsion étudiées	35
I.7	Indicateurs de performance pour l'évaluation du sous-système "propulsion éolienne"	37
I.8	Représentation vectorielle du vent apparent	39
I.9	Schéma de la projection des forces de propulsion et de dérive	39
I.10	Profil du vent réel en mer et du vent apparent associé	40
I.11	Méthode des tranches pour le calcul de la hauteur du centre vélique	41
I.12	Exemple de profil courbé et fin d'une voile souple	42
I.13	Réglages et gréement des voiles souples	43
I.14	Deux exemples de gréement pour voiles souples ("Mini lace" et "Wind Star")	43
I.15	Indicateurs de performance pour l'évaluation du sous-système "propulsion éolienne"	45
I.16	Notes obtenues par les voiles souples aux indicateurs de performance et aux exigences de niveau 2	46
I.17	Deux exemples de profil de voiles rigides	47
I.18	Le système à voile rigide "Jamada"	47
I.19	Indicateurs de performance pour l'évaluation du sous-système "propulsion éolienne"	49
I.20	Notes obtenues par les voiles rigides aux indicateurs de performance et aux exigences de niveau 2	50
I.21	Différentes formes d'aile de kite	51
I.22	Exemples d'application des ailes de kite	52
I.23	Indicateurs de performance pour l'évaluation des ailes de kite	54
I.24	Notes obtenues par les ailes de kite aux indicateurs de performance et aux exigences de niveau 2	55
I.25	Principe de fonctionnement et schéma d'un rotor Flettner	56

I.26	Schéma et photo de rotors Flettner	57
I.27	Indicateurs de performance pour l'évaluation du sous-système "propulsion éolienne"	58
I.28	Notes obtenues par les rotors Flettner aux indicateurs de performance et aux exigences de niveau 2	59
I.29	Schémas d'une turbovoile	60
I.30	Exemples de navires à turbovoiles	61
I.31	Indicateurs de performance pour l'évaluation du sous-système "propulsion éolienne"	62
I.32	Notes obtenues par les turbovoiles aux indicateurs de performance et aux exigences de niveau 2	63
I.33	Notes obtenues par les cinq technologies de propulsion aux indicateurs de performance et aux exigences de niveau 2	65
II.1	Schéma des forces s'exerçant sur le navire	68
II.2	Schéma en coupe d'un rotor Flettner	70
II.3	Schéma vectoriel du vent apparent, du vent réel et de la vitesse d'avance	71
II.4	Courbes expérimentales de portance et de traînée d'un rotor Flettner	72
II.5	Schéma de la projection des forces de propulsion et de dérive	73
II.6	Profil du vent réel en mer et du vent apparent associé	74
II.7	Méthode des tranches pour le calcul de la hauteur du centre vélique	75
II.8	Schéma d'une carène de type Wigley parabolique et identification de ses paramètres géométriques	76
II.9	Paramètres de maillage de la surface libre	78
II.10	Exemples de maillages de surface libre adaptatifs	79
II.11	Maillage de surface libre de référence	81
II.12	Maillage de surface libre minimal	81
II.13	Matrices des écarts de C_r de différents maillages	82
II.14	Détail de la matrice II.13c des écarts de C_r de différents maillages	83
II.15	Erreurs dues au nombre d'itération pour la validation	84
II.16	Visualisation de la carène utilisée pour la validation	85
II.17	Courbe des coefficients hydrodynamiques pour la validation	86
II.18	Schéma de la stratégie de calcul de la puissance maximale produite	88
II.19	Schéma de la stratégie de calcul de la puissance nette	90
II.20	Principaux paramètres du navire étudié	92
II.21	Chaîne de transformation de l'énergie	94
II.22	Courbe de résistance à l'avancement de différentes carènes	96
II.23	schéma de lecture des courbes polaires	97
II.24	Courbe polaire de la puissance électrique nette	98
II.25	Courbe polaire de la vitesse d'avance	99
II.26	Puissance produite au vent de travers en fonction de la vitesse du vent	101
II.27	répartition statistique du rapport de force (traînée des hydrogénérateurs / traînée totale)	102
III.1	Principe de création d'une population de l'algorithme génétique	105
III.2	Implémentation de l'évaluation de la puissance nette	107
III.3	Schéma de la carène à optimiser	108
III.4	Exemple de carène fortement asymétrique de type prao	108
III.5	Représentation du maillage réalisé et du maillage utilisé par le calcul	110
III.6	Placement du centre de gravité en fonction de la répartition des volumes immergés	111
III.7	Schéma de l'implémentation sous ModeFrontier	112
III.8	Courbe du moment de redressement de 3 carènes symétriques	115

III.9	Puissance nette produite par les tous les individus (avec erreur détecté dans l'évaluation de la puissance nette)	117
III.10	Puissance nette obtenue par chaque individu (configuration symétrique)	118
III.11	Statistique de chaque génération (configuration symétrique)	119
III.12	Exemple d'individu généré	120
III.13	Représentation 3D du meilleur individu de l'optimisation symétrique	121
III.14	Courbe polaire de la puissance nette du meilleur individu de l'optimisation symétrique	122
III.15	Puissance nette en fonction de la vitesse du vent réel (optimisation symétrique)	123
III.16	Puissance nette obtenue par chaque individu (configuration libre)	124
III.17	Statistique de chaque génération (configuration libre)	125
III.18	Dispersion et pourcentage d'individus hors contrainte des deux optimisations	126
III.19	Exemple d'individu généré ne respectant pas les contraintes	127
III.20	Représentation de la meilleure carène	129
III.21	Fonctionnements possibles d'un voilier à carène non-symétrique	130
III.22	Courbe polaire de la puissance nette (meilleur individu)	131
III.23	Puissance comparée en fonction de la vitesse du vent réel	132
III.24	Rapport de volume en fonction de la puissance nette	133
III.25	Rapport de volume en fonction de du rapport de vitesse des rotors	134
III.26	Résistance à l'avancement R_w de la carène non-symétrique	134
III.27	Force propulsive et rapport de vitesse des rotors Flettner en fonction de l'angle du vent	135
III.28	Bilan énergétique du navire	137
III.29	Comparaison de la puissance nette évaluée en configuration libre et symétrique	138
III.30	Puissance comparée en fonction de la vitesse du vent réel	139
III.31	Courbe polaire comparée (référence, optimisation symétrique, optimisation libre) de la puissance nette	140
III.32	Exemples d'études réalisées sur les rotors Flettner	143
III.33	Extrapolation de la carène de catamaran en trimaran	145
III.34	Vitesse moyenne des vents en mer sur la période 2000 - 2004 (données QuikSCAT)	146
III.35	Estimation de la production annuelle du système	147
III.36	Pré-requis demandés par les acteurs du système Farwind (1)	156
III.37	Pré-requis demandés par les acteurs du système Farwind (2)	157
III.38	Pré-requis demandés par les acteurs du système Farwind (3)	158

Liste des tableaux

I.1	Exigences à satisfaire pour un projet Farwind viable	32
I.2	Liste des valeurs à calculer	38
I.3	Paramètres principaux des voiles souples	44
I.4	Paramètres principaux des voiles rigides	48
I.5	Paramètres principaux des ailes de kite	53
I.6	Paramètres principaux des rotors Flettner	57
I.7	Paramètres principaux des turbo-voiles	61
II.1	Paramètres d'un rotor Flettner	70
II.2	Paramètres de définition de la carène	76
II.3	Caractéristiques de la carène utilisée pour la vérification	80
II.4	Caractéristiques des maillages de surface libre de référence et minimal	80
II.5	Caractéristiques de la carène utilisée pour la validation	85
II.6	Inventaire des équipements du navire de production et de leur masse respective	94
II.7	Paramètres de forme des 5 carènes testées	95
II.8	Récapitulatif des éléments principaux du navire	96
II.9	Puissance maximale produite et plage angulaire de bon fonctionnement	100
II.10	Performances du navire à l'angle 90° pour différentes vitesses de vent réel	103
III.1	Paramètres de l'algorithme d'optimisation	106
III.2	Détail des configurations d'optimisation symétrique et libre	109
III.3	Listes de contraintes applicables par l'optimisation.	111
III.4	Récapitulatif des éléments principaux du navire	113
III.5	Détail des configurations d'optimisation symétrique et libre	113
III.6	Plages de variation des paramètres à optimiser	114
III.7	Puissance maximale obtenue par la génération 1, 40 et 80 en comparaison de la puissance obtenue par la référence	119
III.8	Paramètres de la carène du meilleur individu (optimisation symétrique)	120
III.9	Caractéristiques de fonctionnement de la meilleure carène	121
III.10	Puissance maximale obtenue par la génération 1, 40 et 80 en comparaison de la puissance obtenue par la référence	124
III.11	Plages de variation des paramètres à optimiser	127
III.12	Paramètres la meilleure carène générée)	128
III.13	Caractéristiques de fonctionnement de la meilleure carène	128

Introduction

Un système de production d'énergie en haute mer

La nécessité d'une nouvelle alternative de production d'énergie

Afin de répondre à l'urgence climatique et d'atteindre les objectifs de limitation du réchauffement climatique, il est nécessaire de développer massivement une production d'énergie durable et non productrice de CO_2 . Selon le rapport du GIEC (1), pour limiter le risque d'augmentation globale de température au delà de 2° , la part de l'approvisionnement en électricité sobre en CO_2 doit augmenter de 30% actuellement à 80% à l'horizon 2050 et à 90% pour 2100 (1). L'énergie éolienne, dont la capacité énergétique mondiale est très grande (2), doit contribuer à ce développement.

Les éoliennes en mer fixes et plus récemment flottantes connaissent actuellement un fort développement (3; 4). Cependant, le potentiel d'exploitation est soumis à plusieurs contraintes résumées sur la figure .1. Tout d'abord la répartition des vitesses de vent en fonction des régions est inégale, et la sélection d'une zone adaptée a un fort impact sur la production d'énergie d'une éolienne. On remarque une différence graduelle de vitesse de vent moyen en fonction de la proximité de la terre : la ressource éolienne est plus intéressante sur la côte et en haute mer qu'à terre comme le montre par exemple la répartition du vent moyen à l'échelle du globe sur la figure .2 (5). Il y a une corrélation entre la ressource disponible et la production d'énergie comme en témoignent les différences de facteur de charge moyen (le facteur de charge correspond sur un temps donné à la différence entre la production maximale possible et la production effective). Pour les éoliennes à terre le facteur de charge est autour de 20 à 30%. Il atteint 30 à 50% pour les éoliennes en mer proches de la côte. Une éolienne en haute mer (1000km de la côte) obtiendrait un facteur de charge de 80% (6).

L'implantation des éoliennes en mer est également limitée par plusieurs facteurs. Pour les éoliennes posées une profondeur maximale de 50 m limite les zones d'exploitations disponibles. Cette contrainte est en partie levée par les éoliennes flottantes qui peuvent être installées à des profondeurs de plusieurs centaines de mètres. Les éoliennes doivent pour la plupart être raccordées au réseau électrique. Une grande longueur de câbles, qui plus est installés sous l'eau, est source de coût supplémentaire. A ces contraintes s'ajoute la forte concurrence des usages de l'espace maritime proche littoral (zones de pêche, trafic maritime, aquaculture, distance aux habitations) qui tend à faire diminuer l'acceptabilité des projets.

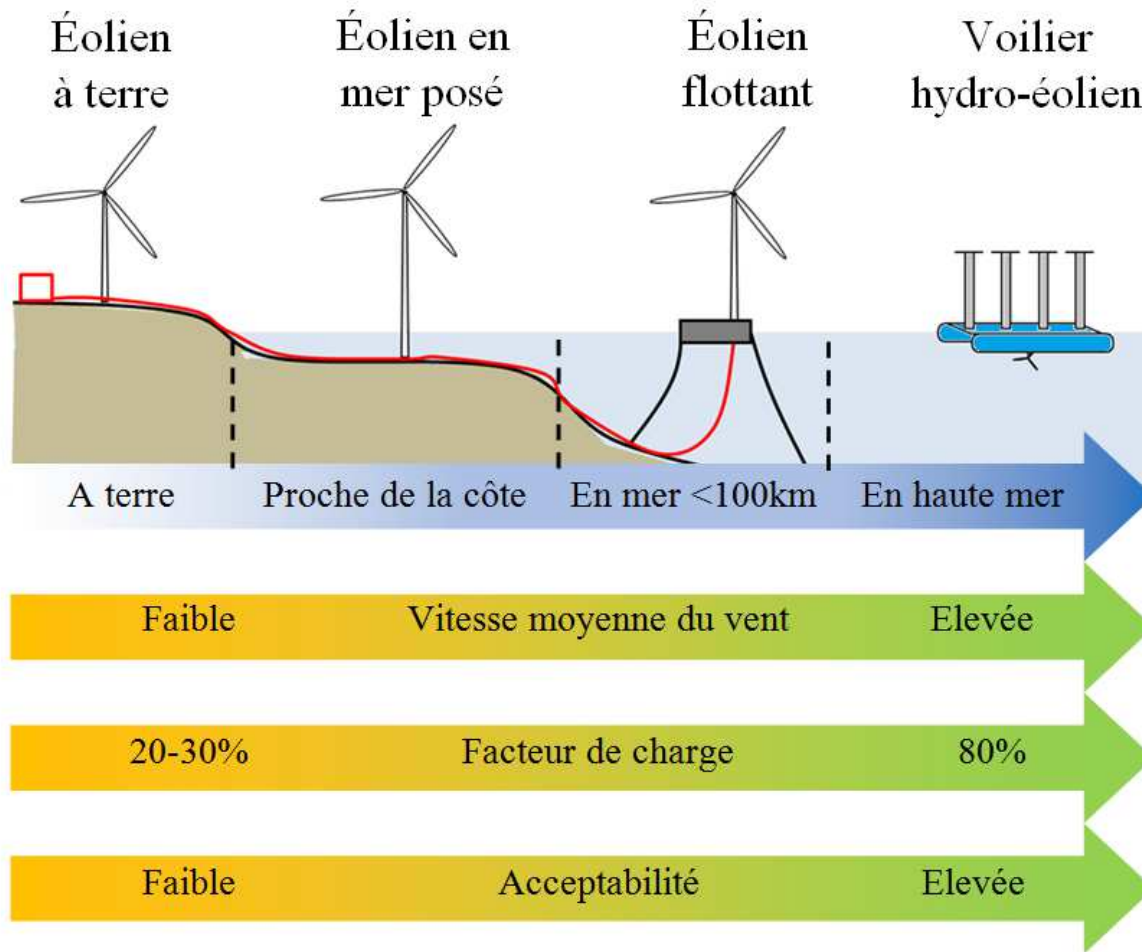


FIGURE .1 – Principales différences entre des systèmes de production éolien à terre, sur la côte et en haute mer.

Pour répondre à ces contraintes et contribuer à l'augmentation de la part d'énergie renouvelables dans la production énergétique, le concept novateur de voilier hydro-éolien a été développé (7). Le positionnement de ce concept par rapport aux autres solutions de production d'énergie éolienne est représenté sur la figure .1. Il repose sur les hypothèses suivantes. On doit disposer d'une unité de production capable de se déplacer en haute mer. Comme l'unité de production est mobile, l'énergie produite doit être stockée à bord. Il n'y a donc pas de coût de câblage électrique. De plus la mobilité du navire permet de réaliser la plupart des opérations de maintenance prévisionnelles à terre sur une infrastructure dédiée (coût moins élevé qu'une opération de maintenance en mer). L'énergie électrique est transformée en hydrogène qui est un vecteur énergétique à forte densité énergétique. Le navire se déplaçant il dispose d'un double avantage permettant d'augmenter fortement son facteur de charge : il est capable d'aller là où la ressource éolienne est la meilleure et il est capable d'adapter dynamiquement sa route en fonction de prévisions météorologiques (cela correspond au routage météorologique). Si on peut s'attendre à ce que le coût d'un voilier-hydrolienne soit plus élevé que celui d'une éolienne, l'hypothèse est que ce coût plus élevé soit amorti par une meilleure organisation de la maintenance (dont une grande partie peut se faire à terre) et par le facteur de charge plus élevé.

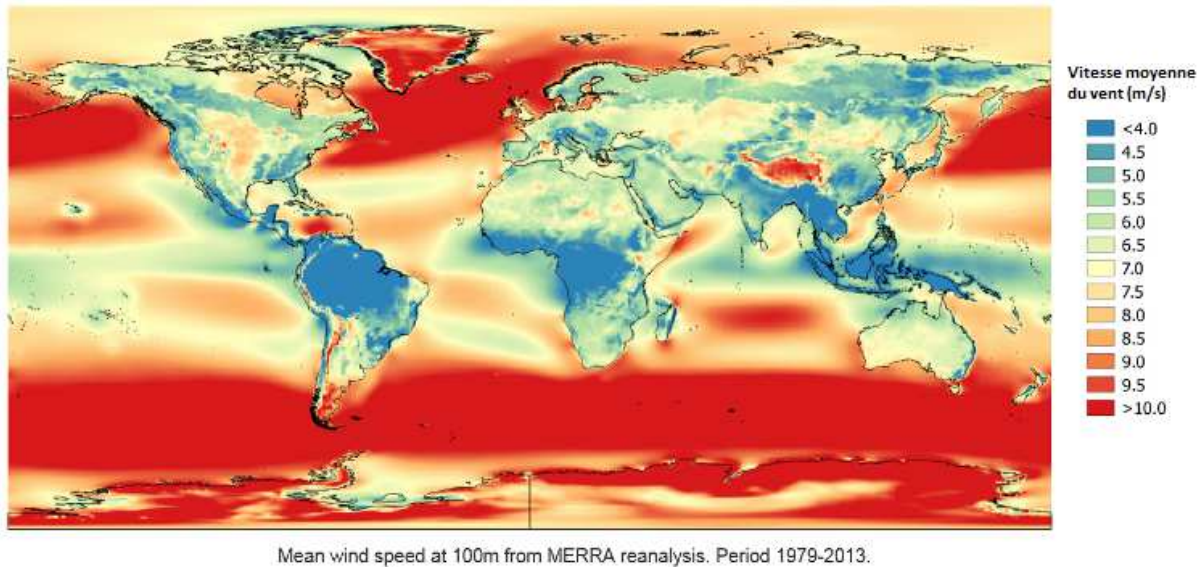


FIGURE .2 – Répartitions des vitesses de vent moyennes sur la période 1979-2013 suivant la reconstruction MERRA (Modern Era-Retrospective Analysis for Research and Applications) (5).

Le voilier hydro-éolien de production d'énergie

Principe de fonctionnement du navire

Le concept de voilier hydro-éolien a été proposé la première fois en 1982 (7). Son fonctionnement est le suivant. Un navire utilise un système de propulsion éolienne pour se déplacer. Le navire est équipé d'hydro-générateurs qui produisent de l'électricité grâce au déplacement du navire. L'électricité est transformée chimiquement en hydrogène et stockée à bord. Un voilier de production doit comporter les sous-systèmes suivants (8) : la structure et la coque du navire, un système de propulsion éolien, des hydrogénérateurs, c'est-à-dire des turbines immergées, sous la coque du navire, une unité de transformation chimique de l'énergie, une unité de stockage de l'hydrogène. Sur la base de cette décomposition on propose ainsi le schéma du voilier hydro-éolien figure .3.

Plusieurs propositions ont été émises autour de ce concept. Pour chaque proposition le principe de fonctionnement est identique mais on note des différences importantes dans le choix des technologies mises en œuvre et dans l'architecture du navire. Pour le système de propulsion éolien par exemple, on peut trouver des ailes de kite (voir Salomon (7) et Kim & Park (8; 9) sur la figure .4), des voiles rigides (voir Ouchi & Henzie (10) sur la figure .4) et des rotors Flettner (voir Gilloteaux & Babarit (11) sur la figure .4).

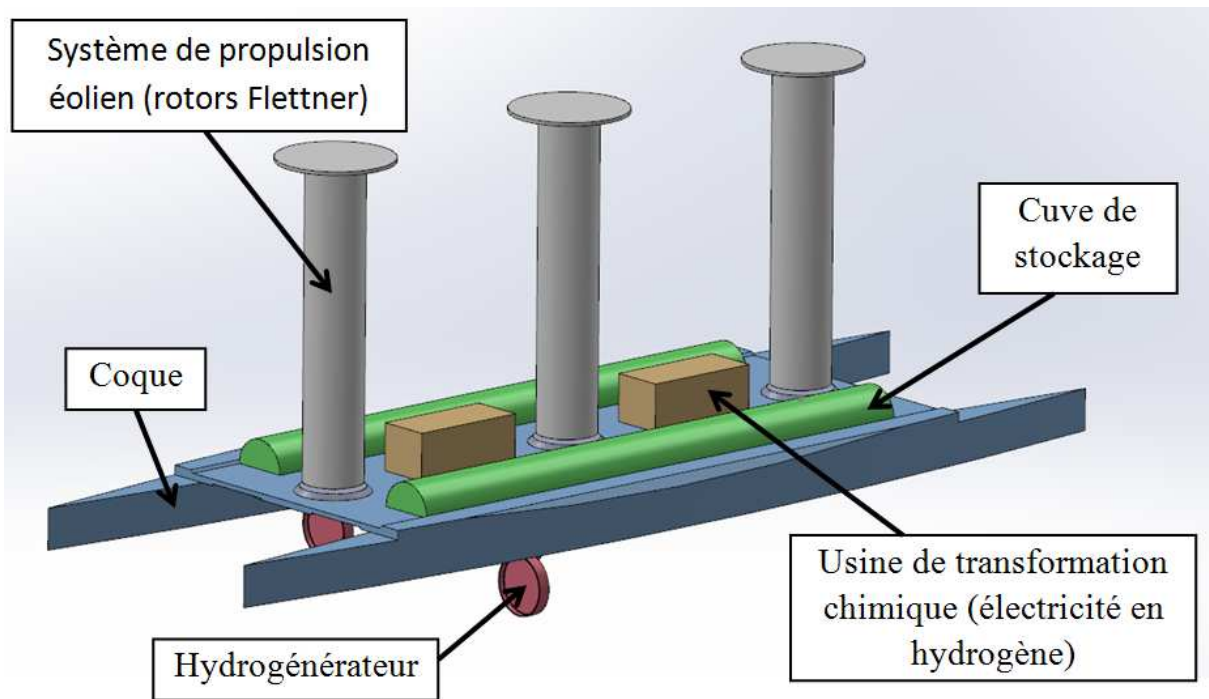


FIGURE .3 – Schéma des sous-systèmes du voilier hydro-éolien.

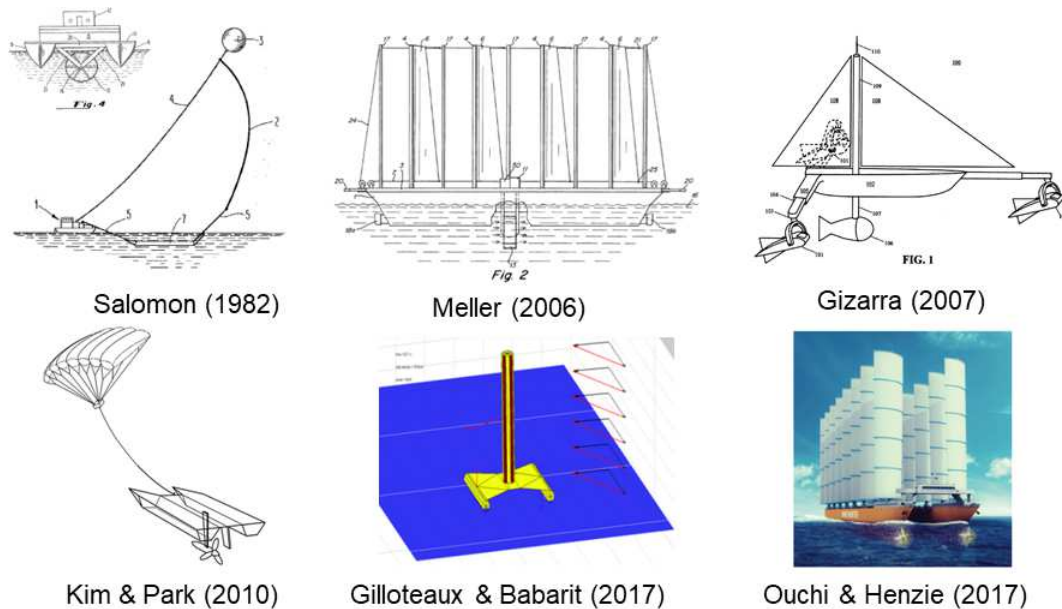


FIGURE .4 – Propositions de voilier hydro-éolien de production d'énergie.

Pour le stockage de l'énergie, plusieurs solutions sont possibles. Pour la plupart des solutions, une transformation chimique coûteuse en énergie est nécessaire. Suivant le vecteur énergétique choisi, le coût énergétique de la transformation ainsi que le poids et le volume du produit varient. Pour le voilier hydro-éolien la contrainte principale réside dans le poids de l'énergie stockée. L'hydrogène est souvent choisi comme vecteur énergétique car ce type de stockage se décharge très peu au cours du temps et possède une excellente densité énergétique (12) (voir comparatif de différents types de stockage figure .5). En comparaison un stockage à l'aide d'une batterie classique ("Lead acid batteries") de densité énergétique d'environ 40 Wh/kg, sera 22,5 fois plus lourd pour une capacité énergétique identique. Compte tenu d'une part de la performance du voilier hydro-éolien (qui dépend de sa masse) et d'autre part de l'éloignement des zones de production (en haute mer) des utilisateurs finaux, ce paramètre est particulièrement important.

		Densité énergétique (Wh/kg)	Durée de vie (cycles)	Auto-décharge par jour	Durée acceptable de stockage
Batteries	Plomb-acide	30-50	500-1000	0,1-0,3%	Minutes-jours
	NiCd	50-75	2000-2500	0,2-0,6%	Minutes-jours
	NaS	150-240	2500	20%	Secondes-heures
	Zebra (Na-Ni-Cl)	100-120	2500+	15%	Secondes-heures
	Li-ion	75-200	1000-10000+	0,1-0,3%	Minutes-jours
Pile à combustible à l'hydrogène		600-1200	1000+	Presque nulle	Heures-mois
Pile à combustible Métal-air		150-300	100-300	Très faible	Heures-mois
Batterie à flux	Vanadium redox	10-30	12000+	Faible	Heures-mois
	Zinc bromine	30-50	2000+	Faible	Heures-mois
Energie magnétique supraconductrice		0,5-5	100000+	10-15%	Minutes-jours
Volant d'inertie		10-30	20000+	100%	Secondes-minutes
Condensateur		0,05-5	50000+	40%	Secondes-heures
Stockage thermique	Liquide basse température	80-120	-	0,5%	Minutes-jours
	Cryogénique basse température	150-250	-	0,5-1,0%	Minutes-jours
	Haute température	80-200	-	0,05-1,0%	Minutes-mois

FIGURE .5 – Caractéristiques des types de stockage de l'énergie (12).

Voilier hydro-éolien ou éolienne dérivante

Pour répondre à la demande de production d'énergie éolienne en haute mer, des propositions d'éoliennes dérivantes ou mobiles ont également été émises (13; 14; 15). La figure .6 montre un exemple de ce concept avec une barge flottante mobile comprenant plusieurs éoliennes. Le principe est le suivant. Une ou plusieurs éoliennes sont installées sur une barge flottante. La barge flottante peut être dérivante (et placée en mer par remorquage) ou être équipée de ses propres moyens de déplacement. De la même manière que pour le voilier hydro-éolien, l'énergie électrique est convertie en hydrogène et stockée à bord de la barge.

Par rapport au voilier hydro-éolien la réalisation d'éoliennes mobiles pose cependant plusieurs difficultés techniques. Premièrement la différence de fluide de l'unité de production (hydro-turbine ou éolienne) génère des différences de design importantes. Une éolienne doit en effet avoir une grande taille pour produire suffisamment d'énergie. A titre d'exemple, pour une puissance produite de 2 MW à une vitesse de vent de 10 m/s, une éolienne tripale et à axe horizontal de 80 m de diamètre est nécessaire. En comparaison, pour un voilier hydro-éolien qui navigue à environ 10 m/s, cette puissance est atteinte avec deux turbines de diamètre 4,25 m (voir les résultats du chapitre II). A cause des moments importants engendrés par l'éolienne, la barge devra ainsi être de grande taille pour assurer sa stabilité.



FIGURE .6 – Ferme éolienne mobile (13).

L'énergie nécessaire au déplacement et/ou au maintien en position de la barge est également un aspect important de ce genre de concept en terme de performance nette. Alors que pour un voilier hydro-éolien, l'ensemble est conçu pour fonctionner à une vitesse élevée en minimisant la résistance à l'avancement autre que celles engendrée par la turbine, dans le cas d'une éolienne mobile l'efficacité énergétique du déplacement à faible vitesse est un défi à relever.

Cependant, à ce stade de développement de ces deux concepts, il reste des incertitudes à lever. Ils répondent aux mêmes enjeux de production d'énergie en haute mer et doivent ainsi tous deux être explorés. Il est également possible que ces deux concepts trouvent une fonction de production spécifique. On peut par exemple imaginer les voiliers hydro-éolien capables de produire sur des zones maritimes éloignées et soumis à des vents plus instables (de par leur vitesse et leur capacité de routage météorologique), alors que les éoliennes mobiles seront plus intéressantes dans des zones de production proches de la côte et aux vents plus réguliers.

Durant cette thèse, il aurait été difficile d’aborder de front les deux concepts. La modélisation d’une éolienne mobile et d’un navire de production est effectivement très différente et demanderait des outils numériques dédiés. On a choisit de se focaliser sur le voilier hydro-éolien qui nous semble être une solution pertinente pour les raisons évoquées ci-dessus. Il sera par la suite intéressant, en disposant des résultats et modèles développés durant la thèse, de réaliser une comparaison plus fine avec les éoliennes dérivantes.

Du navire au système de production d’énergie

Le système de production d’énergie dont fait partie le voilier hydro-éolien a deux types de fonctionnement possibles. Dans le premier cas représenté sur la figure .7a, un navire hydro-éolien est rattaché à un terminal à terre. Il effectue régulièrement des trajets de production à partir du terminal. A la fin de chaque trajet, le navire décharge la production au terminal. Ce fonctionnement demande peu de navires et d’infrastructures. Elle est recommandée pour les petites productions. Le facteur de charge du système risque d’être diminué en raison de la proximité du navire à la côte (les vitesses de vent plus faibles sur les zones proches du littoral (6)).

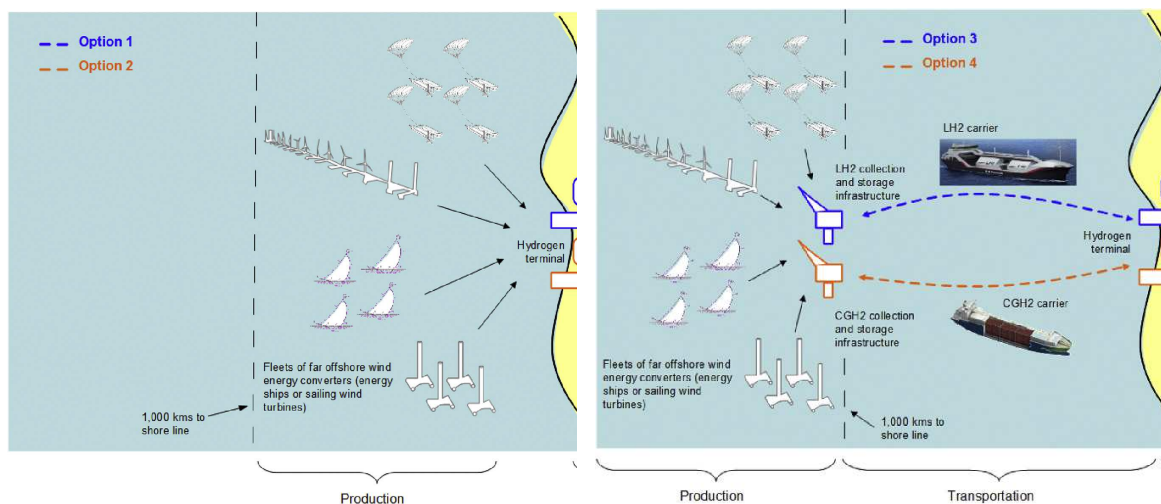


FIGURE .7 – Fonctionnement du système de production d’énergie en haute mer suivant deux hypothèses (16) : avec retour à terre du voilier hydro-éolien (à gauche), sans retour à terre du voilier hydro-éolien (à droite).

Dans le deuxième cas représenté sur la figure .7b, on dispose d'une flotte de voiliers hydro-éoliens. La flotte occupe une zone de production située en haute mer, optimisant sa production par routage météorologique. Des navires cargos viennent décharger la production des voiliers hydro-éolien et la ramènent à un terminal à terre. L'avantage de ce fonctionnement, qui demande toutefois plus de navires et d'infrastructures, est que les voilier hydro-éolien sont en permanence dans la zone de production. Ils disposent ainsi de conditions de vents plus favorables et ne risquent pas de gêner les autres usagers de l'espace maritime.

Problématiques abordées

Cette thèse est centrée autour de trois problématiques principales présentées dans les paragraphes ci-dessous. La première problématique est l'estimation de la capacité de production d'un voilier hydro-éolien, qui est une question centrale du développement de ce concept. Les deux autres problématiques sont des approches comparatives du voilier, en adoptant premièrement un point de vue système puis en adoptant une méthode numérique.

Performance énergétique du navire Au cours du développement d'un nouveau concept on cherche à savoir si ce concept est réalisable et viable à long terme. Pour une solution de production d'énergie il est important de se demander si cette solution pourra être largement adoptée dans le futur et comment elle se place par rapport aux autres types de production. Cette question est abordée dans plusieurs études techno-économiques du voilier hydro-éolien (16; 17; 18). On doit alors s'interroger sur la capacité de production (c'est-à-dire quelle quantité peut produire le système) et le prix de l'énergie produite (16). Il est également pertinent d'observer le lien entre le budget investi dans le développement d'une technologie et sa réussite (19). L'estimation fiable de la capacité de production et du prix de l'énergie est un levier important pour inciter les investisseurs et ainsi favoriser l'émergence de cette technologie. C'est donc autour de l'évaluation de la capacité de production qu'a été construite cette thèse.

Analyse comparative du point de vue système Parmi les études sur le voilier hydro-éolien, on trouve une grande variété de propositions de systèmes mais peu de comparaison des systèmes entre eux. Durant cette étude, on choisit une attitude comparative qui permettra de réaliser des choix argumentés en amont de la modélisation.

Un élément de différenciation majeur des propositions de navire de production est le choix de technologie de chacun des sous-systèmes (exemple du système de propulsion où l'on trouve des ailes de kite, des rotors Flettner, des voiles rigides, etc.). Pour réaliser une comparaison des technologies sélectionnées pour les sous-systèmes, on adoptera le point de vue du système c'est-à-dire que l'on évaluera l'impact des choix sur le système complet de production d'énergie. Cette approche a l'avantage de prendre en compte la frontière du système (c'est-à-dire l'ensemble des acteurs qui interagissent avec le système) et sa temporalité (c'est-à-dire les différentes phases du cycle de vie du système).

Analyse comparative numérique La comparaison technologique ne permet toutefois pas de prendre en compte tous les éléments de choix d'un voilier hydro-éolien. En effet, la modélisation numérique du navire, qui est nécessaire pour évaluer ses capacités, oblige à sélectionner de nombreux paramètres (la longueur de la coque, le nombre de rotor, la masse, etc.). L'impact de chaque paramètre sur le résultat final ainsi que l'interaction entre les paramètres est difficile à estimer en raison de la complexité du modèle.

Pour répondre à cette troisième problématique on choisit de réaliser une comparaison à l'aide d'outils numérique (c'est-à-dire une optimisation). Ce type de comparaison, par rapport à l'approche comparative système, permet d'évaluer très rapidement un grand nombre de possibilités (voir dans le chapitre III où 1000 à 2000 cas sont évalués pour chaque optimisation). La limitation principale réside dans le fait que le système doit être clairement défini (c'est-à-dire décrit par un modèle numérique). Ainsi bien que de nombreux cas puissent être étudiés, leur variété sera plus faible. L'application sélectionnée portera sur la comparaison de formes de carènes du voilier hydro-éolien précédemment défini.

Contenu du manuscrit

Choix technologique des composants du navire Le premier chapitre présente l'analyse comparative d'un point de vue système. La première partie concerne les méthodes utilisées. Elle a abouti à la liste des exigences pour un projet viable qui est un outil d'aide à la décision pour les choix technologiques des sous-systèmes du voilier hydro-éolien. La seconde partie aborde une étude de cas sur le choix du système de propulsion du navire. Cinq technologies de propulsion sont étudiées : les voiles souples, les voiles rigides, les ailes de kite, les rotors Flettner et les turbovoiles.

Modèle du navire Le deuxième chapitre est consacré au modèle numérique du voilier hydro-éolien. Ce modèle est une évolution d'un modèle précédemment développé au laboratoire (11). La première partie du chapitre développe les méthodes, hypothèses et équations régissant ce modèle numérique. La seconde partie aborde une étude de cas. Celle-ci est réalisée sur un catamaran de longueur 80 m et équipé de 3 rotors Flettner. Les résultats montrent que la puissance électrique nominale de 1,7 MW est atteinte pour des vitesses de vent de 12 à 14 m/s. Le comportement du navire en fonction de l'angle et de la vitesse du vent est détaillé.

Optimisation de la forme de coque Le troisième et dernier chapitre est consacré à une optimisation des paramètres du modèle défini dans le chapitre 2. Dans la première partie les méthodes et le fonctionnement de l'optimisation sont expliqués. Sont ainsi présentés les ajustements nécessaires du modèle numérique pour être intégré à l'optimisation. Dans la seconde partie est présentée une étude de cas sur l'optimisation de la forme de carène du voilier hydro-éolien. Cette étude se limite aux carènes de type catamaran. Des carènes non-symétriques de type prao¹ sont testées. Il est montré que la méthode d'optimisation permet d'augmenter significativement la puissance produite par le navire étudié dans le chapitre II. Les résultats comparatifs montrent également une meilleure performance des carènes non-symétriques par rapport aux carènes symétriques.

1. Prao est un nom générique, initialement utilisé pour désigner des voiliers multicoques indonésiens. Il désigne aujourd'hui tout type de voilier multicoque composé d'une coque principale et d'un ou plusieurs balanciers (coques plus petites placées de part et d'autre de la coque principale).

Chapitre I

Choix technologiques des composants du navire

I.1 Méthodes

Dans cette section est présentée une méthode pour la conception d'une solution performante de navire. Cette étude est de type "ingénierie système" et s'inspire en grande partie des recommandations de ce domaine (20). Des études de ce type ont été réalisées sur d'autres types de production d'énergie comme l'énergie des vagues (21). La question du coût et de la compétitivité de l'énergie produite est souvent centrale. L'objectif de l'étude réalisée est de proposer des outils permettant de réaliser les choix de technologie pour un système en prenant en compte leur impact sur tout le système.

On effectue dans la première sous-section une description système grâce à des outils classiques : définition de la mission, description logique des sous-systèmes et description du cycle de vie du système. La deuxième sous-section décrit la méthode pour lister les acteurs du projet, dont les fonctions et besoins sont l'objet de la troisième sous-section. Enfin la dernière sous-section montre les résultats que l'on peut obtenir par cette méthode : l'arbre des exigences pour un projet viable.

I.1.1 Description du système étudié

On réalise une description préalable du système étudié. La description du système est réalisée en trois étapes. On décrit d'abord la mission du système qui correspond à sa fonction principale. On définit ensuite les sous-systèmes qui le composent ainsi que ses sous-sous-systèmes. Chaque élément est défini par sa fonction au sein du système. Il s'agit donc d'une description logique (et non physique) du système étudié. Enfin, on décrit le cycle de vie complet du système (de la conception au démantèlement), et les tâches de chaque étape du cycle de vie. Cette description préalable du système permet de définir les frontières physiques et temporelles du système.

I.1.1.1 Mission du système

On définit la mission du système Farwind. On considère l'intégralité du cycle de vie du système. Le système est supposé mature. De plus, on suppose qu'il existe de nombreux exemples de systèmes Farwind déployés et que plusieurs technologies certifiées de navire de production sont disponibles. On choisit comme exemple un système de production d'énergie éolienne en haute mer. Ce type de système sera appelé système "Farwind" (contraction de "far offshore wind energy"). On peut alors écrire la mission permettant à un système Farwind d'être viable :

"Un système Farwind convertit l'énergie du vent en haute mer en hydrogène stocké puis le livre aux utilisateurs d'hydrogène de manière compétitive d'un point de vue économique, sociétal et environnemental".

Dès l'expression de la mission, on choisit de faire apparaître les contraintes non seulement techniques mais aussi économiques, sociales et environnementales. Cette pluralité de points de vue est un élément important de la méthode étudiée.

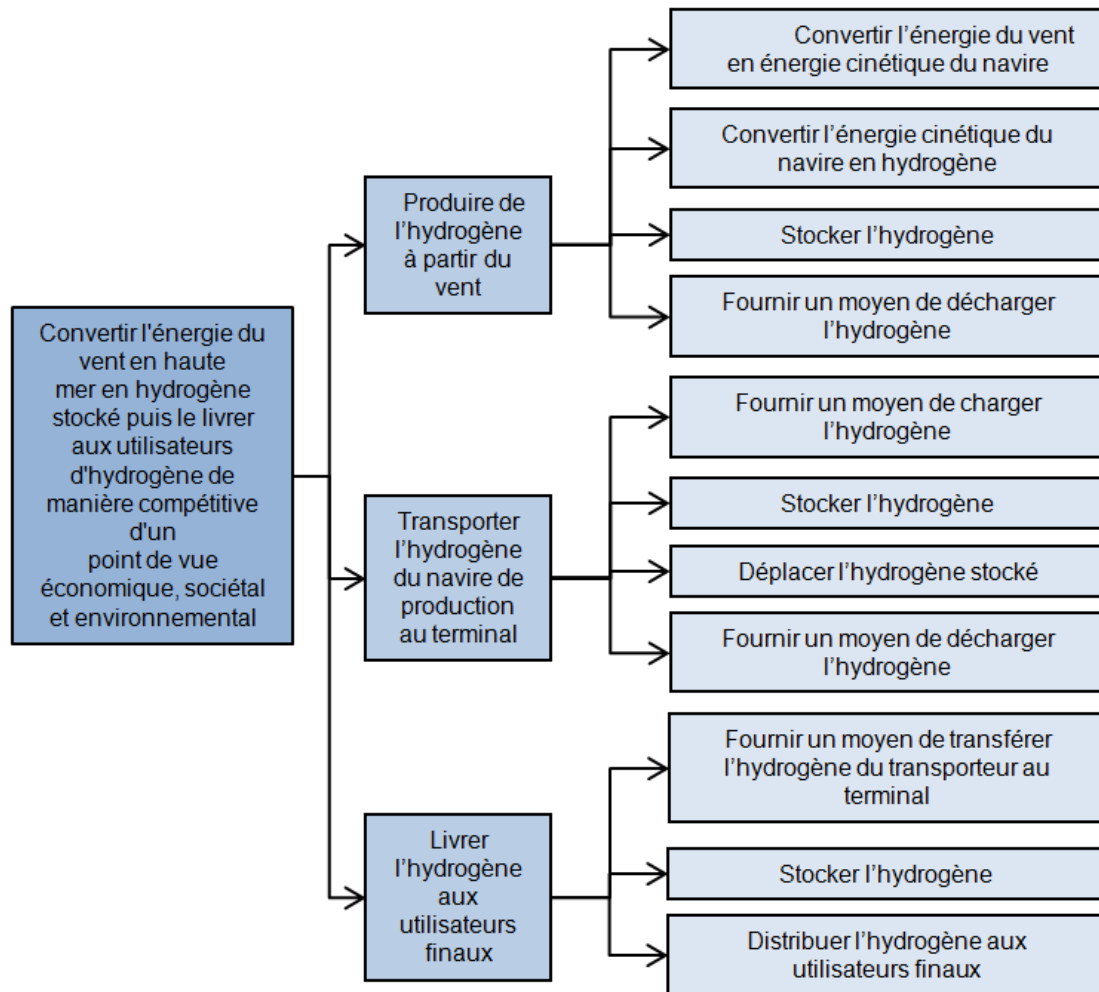


FIGURE I.1 – Description des sous-systèmes et sous-sous-systèmes d'un système Farwind.

I.1.1.2 Description des sous-systèmes

On réalise la description logique du système. On décompose pour cela le système en sous-systèmes, définis par leurs fonctions. Chaque sous-système est ensuite également décomposé en sous-sous-systèmes. La figure I.1 présente cette description du système. On y trouve le système, représenté par sa mission (case foncée à gauche). Il y a ensuite 3 sous-systèmes correspondant aux fonctions suivantes : produire l'hydrogène, transporter l'hydrogène (déplacement maritime) et livrer l'hydrogène (déplacement terrestre). Le voilier hydro-éolien par exemple, remplit la fonction "produire de l'hydrogène à partir du vent". Il est lui-même composé de 4 sous-systèmes. Le système de propulsion éolien qui sera l'objet de l'étude de cas I.1.2 est l'un de ces sous-systèmes du navire. On obtient en tout 11 sous-sous-systèmes du système de production Farwind.

I.1.1.3 Cycle de vie du système

On analyse le cycle de vie du système Farwind qui comporte 6 étapes : la conception, les achats, la construction, la mise en service, l'exploitation et le démantèlement (22). La figure I.2 montre un résumé de ce cycle de vie. La phase de fonctionnement est la plus longue et celle où le système produit de l'hydrogène. Elle comporte elle-même 4 sous-phases qui correspondent aux modes de fonctionnement des navires : la pleine capacité, le déchargement, le déplacement et l'arrêt. Chaque phase du cycle de vie fait l'objet d'une description ci-dessous.

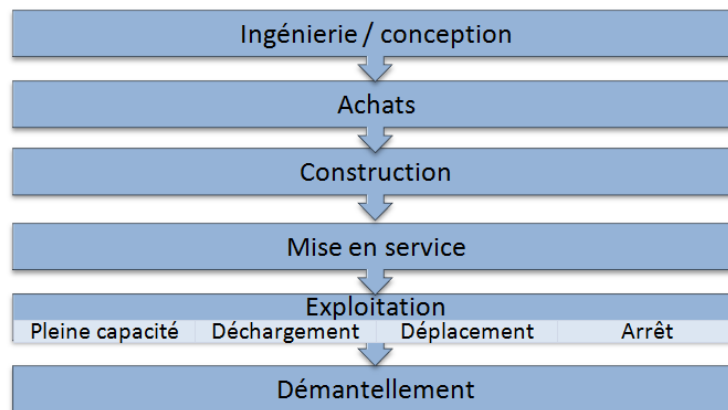


FIGURE I.2 – Étapes du cycle de vie d'un projet Farwind.

Conception La conception est la première phase du cycle de vie. L'objectif est de concevoir le système Farwind en y incluant ses aspects techniques, légaux et financiers. Cette phase commence par l'identification, par les développeurs du projet de conversion de l'énergie du vent en mer, d'une opportunité de développement d'un système. Cela inclut les éléments suivants : identification des zones marines disponibles et à fort potentiel énergétique du vent, identification des utilisateurs potentiels d'hydrogène, identification des potentiels investisseurs, identification des sites adaptés à l'implantation de terminaux d'hydrogènes et d'installation de maintenance. Le terminal et ses équipements peuvent être prévus dans un port existant ou demander le développement d'une zone portuaire spécifique. Durant cette phase, les activités des développeurs du projet de conversion de l'énergie du vent en mer visent à :

- Réaliser la conception complète et les spécifications d'un système Farwind. Cela inclut la sélection d'une technologie adaptée et certifiée de conversion de l'énergie du vent, l'évaluation de la production d'hydrogène attendue à long terme, l'établissement d'un scénario d'exploitation incluant l'identification :
 - De l'emplacement du terminal de stockage de l'hydrogène. Le projet peut toutefois s'appuyer sur un terminal existant.
 - De la technologie de transport de l'hydrogène et des trajets jusqu'au terminal.
 - Du réseau de distribution existant et des renforcements nécessaires.
 - De l'emplacement des équipements de maintenance. Le projet peut toutefois s'appuyer sur des équipements de maintenance existants.

Cela inclut également de réaliser le calendrier prévisionnel des phases suivantes du projet (achats, construction). Certaines spécifications techniques peuvent être sous-traitées à des consultants (par exemple des compagnies de génie maritime). Il est attendu que la conception finale du système et de ses procédures soit approuvée et/ou certifiée par un organisme de certification.

- Réaliser un plan de développement commercial profitable (un "business model"). Cela peut inclure un accord avec un utilisateur important d'hydrogène (par exemple une raffinerie ou un producteur d'engrais). Alternativement, le plan de développement commercial peut viser la vente d'hydrogène sur le marché local. Si le renforcement du réseau de distribution local est nécessaire, son coût doit être inclus dans le plan de développement commercial. Le plan de développement commercial peut inclure des mécanismes de soutien financier pour l'hydrogène durable (par exemple des primes d'incitation, des subventions, des obligations d'État, des emprunts garantis, des taxes spécifiques, etc.).
- Négocier des baux avec les responsables portuaires pour l'occupation de zones portuaires ou l'utilisation des équipements portuaires disponibles.
- Obtenir les permis et autorisations nécessaires. Cela inclut le permis de construction ou d'extension du terminal et des équipements de maintenance. Cela peut inclure un permis d'utilisation de l'espace maritime. Des permis d'organismes de régulation peuvent également être demandés (exemple permis d'agences de régulation environnementales ou de sécurité). Les permis d'agences de régulation peuvent inclure la conduite d'étude environnementales et/ou la surveillance des impacts.
- Sécuriser le financement des investisseurs et financeurs.
- Obtenir l'adhésion des communautés locales et des autres utilisateurs de la zone (près des installations côtières tels que le terminal d'hydrogène et les installations de maintenance). Cela peut inclure des réunions publiques et des consultations.

Achats Une fois que la conception du système Farwind est réalisée et que les financements sont disponibles, le projet peut entrer dans la phase d'achats. Cette tâche est réalisée par le développeur du projet. L'objectif est de passer des contrats avec des fournisseurs pour tous les sous-systèmes et services qui doivent être fournis pour le projet Farwind jusqu'à la phase "fonctionnement" du cycle de vie. Les sous-systèmes typiques qui peuvent être fournis par les fournisseurs sont le système Farwind, les navires et camions de transport de l'hydrogène, les systèmes ou navires de surveillance, le terminal à hydrogène, les installations de maintenance, la construction et/ou le renforcement du réseau de distribution d'hydrogène, et les sous-systèmes de communication et de contrôle. Les contrats doivent préciser les exigences en matière de normes de qualité et identifier les mesures de contrôle de la qualité qui seront prises au cours de la prochaine étape du cycle de vie. Au cours de cette étape, il peut être nécessaire de mettre à jour le calendrier et le modèle commercial du projet Farwind. On estime également que le prestataire de services de maintenance devrait être sélectionné et contracté à ce stade du cycle de vie (au moins pour les premières années de fonctionnement du projet). Certaines des activités de maintenance peuvent être sous-traitées aux fournisseurs qui ont initialement fourni les systèmes (par exemple, en contractant la maintenance des convertisseurs d'énergie du vent en mer aux fournisseurs des convertisseurs d'énergie du vent en mer).

Construction Une fois que les contrats avec les fournisseurs de sous-systèmes sont en place, la construction du terminal de stockage d'hydrogène, de l'installation de maintenance, du centre de communication et de contrôle et du réseau de distribution commence. La construction consiste à renforcer les installations existantes ou à créer de nouvelles installations. Les fournisseurs de sous-systèmes peuvent s'appuyer sur des fournisseurs de second rang pour les sous-systèmes, les composants ou les matériaux. Les fournisseurs de deuxième niveau peuvent eux-mêmes s'appuyer sur des fournisseurs de troisième niveau pour les sous-systèmes, les composants, les matériaux, etc. La chaîne d'approvisionnement peut en effet être un arbre de fournisseurs très complexe. Pour la fiabilité et la disponibilité de la chaîne d'approvisionnement, la taille du groupe de fournisseurs devrait augmenter avec le rang décroissant des fournisseurs. Les sous-systèmes ou les composants fournis par les fournisseurs de deuxième niveau et de niveau inférieur doivent être des produits commerciaux disponibles sur le marché.

En outre, la phase de construction peut inclure des activités telles que le transport terrestre et le stockage des sous-systèmes, et/ou le transport maritime et le stockage des sous-systèmes (par exemple pour les convertisseurs d'énergie éolienne en haute mer, les navires de transport de l'hydrogène et les navires de surveillance), le contrôle qualité et les tests de fonctionnalité.

Les tests de fonctionnalité et le contrôle de la qualité sont essentiels à cette étape du cycle de vie, car ces aspects permettent de réduire les risques et d'attirer les investisseurs. Ces activités peuvent se dérouler dans n'importe quel ordre et avec d'éventuelles répétitions.

Au cours de cette étape du cycle de vie, il peut être nécessaire de mettre à jour le calendrier et le modèle commercial du projet Farwind pour tenir compte des retards et/ou des variations de coûts. À la fin de cette étape, les sous-systèmes sont livrés et attendent d'être mis en service.

Mise en service L'étape suivante du cycle de vie est la mise en service. L'objectif est de rendre le système Farwind opérationnel. Lors de la mise en service, la fonctionnalité des sous-systèmes est vérifiée (par exemple, essais en mer des convertisseurs d'énergie éolienne du vent en mer). Cette étape peut nécessiter la participation active des organismes de certification avant que les convertisseurs d'énergie, les pétroliers et le terminal puissent entrer en service.

Au cours de cette étape du cycle de vie, il peut à nouveau être nécessaire d'actualiser le calendrier et le modèle commercial du projet Farwind pour tenir compte des retards et/ou des variations de coûts.

Exploitation L'étape suivante est celle de l'exploitation. L'objectif est de maximiser les revenus en produisant et en vendant de l'hydrogène tout en maintenant la capacité du système Farwind à le faire pendant toute la durée de vie du système. La phase d'exploitation commence lorsque l'ensemble du système est mis en service. À ce stade, le développeur de projet Farwind peut vendre le projet à un opérateur de système Farwind ou à des investisseurs pour lesquels le système Farwind est un produit d'investissement ; ou à plusieurs opérateurs ou investisseurs pour les différents sous-systèmes. Dans le cas des investisseurs, les activités d'exploitation seront sous-traitées aux opérateurs. Un tel transfert de propriété et de responsabilités est typique de l'industrie de l'énergie éolienne. En l'absence d'un tel transfert, le développeur peut jouer le rôle d'opérateur. Il peut aussi sous-traiter l'exploitation du système ou des sous-systèmes à des opérateurs.

Pendant la phase d'exploitation, il est probable que les sous-systèmes de conversion de l'énergie éolienne (par exemple, les convertisseurs mobiles d'énergie éolienne en haute mer) changeront leur mode de fonctionnement en fonction des conditions météorologiques et de l'état des convertisseurs. Les modes opérationnels peuvent comprendre un mode de pleine capacité, un mode de déchargement, un mode de déplacement et un mode d'arrêt.

- Dans le mode de pleine capacité, chaque convertisseur suit des trajets optimisés par routage météorologique afin de produire la quantité maximale d'hydrogène en un minimum de temps dans la zone d'exploitation. La zone d'exploitation est définie en tenant compte des contraintes juridiques potentielles et des autres utilisateurs maritimes.
- En mode de déchargement, l'hydrogène stocké dans le convertisseur est transféré vers un navire-citerne ou un terminal à terre. La sécurité est la principale préoccupation durant ce mode de fonctionnement.
- En mode de déplacement, les convertisseurs peuvent produire ou non de l'hydrogène, mais l'objectif n'est pas de maximiser la production. L'objectif est de déplacer les convertisseurs Farwind d'un endroit à l'autre, premièrement en maintenant l'intégrité de la flotte de convertisseurs, et, deuxièmement, en un minimum de temps. Les raisons d'entrer en mode navigation comprennent le fait de devoir éviter une zone où les vitesses de vent sont élevées et/ou où l'état de la mer est sévère ; le fait de devoir atteindre le navire de transport d'hydrogène ou le terminal d'hydrogène pour le déchargement ; le fait de devoir atteindre l'installation de maintenance pour la maintenance ; ou le fait de devoir atteindre la zone d'opérations depuis un autre endroit.
- En mode d'arrêt, le convertisseur est arrêté en raison d'une défaillance ou d'un entretien. L'objectif de ce mode est de permettre un accès sûr à un sous-système ou à un composant défaillant à des fins de réparation ou de maintenance. Il exige que les sous-systèmes défaillants soient mis hors tension pour permettre un accès sûr. Il peut être nécessaire d'évacuer ou de brûler l'hydrogène stocké au préalable.

Les activités de l'opérateur du système Farwind comprennent le contrôle du mode de fonctionnement des convertisseurs Farwind en fonction de facteurs externes, et le maintien des convertisseurs en conditions opérationnelles. Il comprend la réalisation d'activités de maintenance planifiées et non planifiées. Les activités de maintenance peuvent être sous-traitées à un prestataire de services de maintenance. Les pièces de rechange peuvent être fournies par les fournisseurs de sous-systèmes Farwind (y compris le fournisseur des convertisseurs Farwind).

Bien entendu, les activités de l'opérateur du système Farwind comprennent également la vente de l'hydrogène, ce qui englobe l'exploitation du terminal d'hydrogène et des éventuels camions-citernes à hydrogène. L'hydrogène peut être vendu à un gros consommateur d'hydrogène par le biais d'un accord d'achat, ou sur le marché local de l'hydrogène. Dans les deux cas, l'opérateur du système Farwind doit assurer un approvisionnement régulier à ses clients.

La phase de cycle de vie d'exploitation se termine à la fin de la durée de vie du système Farwind.

Démantèlement À terme, l'opérateur Farwind devra se défaire de ses navires, terminaux et installations. Les opérations de recyclage peuvent être sous-traitées. Le recyclage de certains composants peut générer des revenus complémentaires dans cette dernière étape du cycle de vie. Les pièces non recyclables seront stockées et mises en décharge, moyennant un coût.

I.1.2 Identification des acteurs du projet

On effectue l'inventaire des acteurs agissant dans et autour d'un système Farwind. Comme les autres étapes de la méthode, l'inventaire des acteurs se veut exhaustif. Précédemment on a réalisé la liste des tâches à réaliser pour chaque étape du cycle de vie. On associe ensuite un ou plusieurs acteurs à chaque tâche.

Le tableau I.3 dresse la liste complète des acteurs. Sur ce tableau on voit également à quelle étape du cycle de vie chaque acteur intervient. Au total, 33 acteurs sont identifiés. Les acteurs sont de nature variée. On trouve par exemple :

- Des organismes financiers (investisseurs, financeurs, etc.)
- Des fournisseurs et sous-traitants du projet (exemple société de génie maritime, prestataires de maintenance)
- Des services de régulation pour par exemple le contrôle de la sécurité, des zones maritimes et de l'environnement.
- Des acteurs politiques.
- Des citoyens (grand public, communautés locales).

Les acteurs peuvent agir durant une seule étape du projet (par exemple les sociétés de transport et de stockage durant la construction) ou sur toute la vie du projet (par exemple les agences de contrôle du trafic maritime et les financeurs).

Acteurs du projet	Etapes du cycle de vie								
	Conception	Achats	construction	Mise en service	Fcontionnement				Démentèlement
					Pleine capacité	Déchargement	Déaplacement	Arrêt	
Investisseur									
Financier									
Utilisateur d'hydrogène									
réseau									
Organisme de contrôle environnemental									
Agence de recherche et de secours maritime									
Autres services de régulation (exemple agence de contrôle du trafic maritime, agences de contrôle santé et sécurité, etc.)									
Agence de gestion du site de production (si applicable)									
Autres utilisateurs de la zone de production (pêche, commerce, activités militaires, extraction)									
Agence de gestion de la zone de transit									
Autres utilisateurs de la zone de transit (pêche, commerce, activités militaires, extraction)									
Agence de gestion de la zone portuaire									
Service de régulation de la construction portuaire									
Autres utilisateurs de la zone portuaire									
Service de développement local, régional et national ou décideur politique									
Communauté locale									
Grand public									
Développeur du projet Farwind									
Opérateur du système Farwind									
Fournisseur des flottes Farwind (incluant les drones, les sous-systèmes de surveillance et les navires de transport)									
Prestataire de maintenances des flottes Farwind									
Fournisseur du terminal d'hydrogène (incluant le stockage)									
Prestataire de maintenance dy terminal d'hydrogène									
Société de distribution d'hydrogène et/ou de construction du réseau de distribution									
Fournisseur du centre de communication et de contrôle									
Société de génie océanique									
Organisme de certification									
Société de recyclage et de traitement des déchets									
Assureur									
Société de transport terrestre									
Socitéte de stockage terrestre									
Socitéte de transport maritime									
Société de stockage maritime									

FIGURE I.3 – Liste des acteurs agissant dans et autour d'un système Farwind.

I.1.3 Fonctions et besoins des acteurs du projet

Pour chaque acteur identifié on indique ses fonctions. Les fonctions d'un acteur correspondent à la liste des tâches qu'il effectue pour le projet. Les fonctions sont des éléments du type : "obtient des financements auprès des financeurs", "réalise les opérations de maintenance".

On indique ensuite les exigences de chaque acteur. Les exigences regroupent les besoins (éléments nécessaires à la collaboration de cet acteur) et les souhaits (éléments non nécessaires mais qui incitent cet acteur à collaborer). Les exigences sont des éléments du type : "risque sur les revenus bien compris et maîtrisables", "exigences réglementaires atteintes", "ventes stables pour maintenir l'activité".

L'étude complète est disponible en annexe A dans les tableaux [III.36](#) page [156](#), [III.37](#) page [157](#) et [III.38](#) page [158](#). Il est difficile toutefois, au vu du nombre d'acteurs et d'exigences (61 exigences au total), de prendre en compte tous ces paramètres. On remarque également que bon nombre d'exigences des acteurs sont redondants. L'exemple précédent entre autres ("ventes stables pour maintenir d'activité") est mentionné par 11 acteurs différents. On réalise alors un résumé de ces exigences pour un projet Farwind.

I.1.4 Exigences pour un projet Farwind viable

On regroupe l'ensemble des exigences indépendamment des acteurs. Cela permet de ne plus avoir d'exigences redondantes car exprimées par plusieurs acteurs. On regroupe ensuite certaines exigences en une seule exigence plus générale. Par exemple les exigences "avoir peu d'incertitude sur les prix et les revenus" et "être un système durable" vont toutes deux contribuer à une exigence plus générale "être un investissement sûr". A l'inverse, certaines exigences seront discrétisées en exigences plus détaillées ("avoir un coût d'investissement faible" sera détaillée en "avoir un design bon marché" et "être constructible à bas coût"). On obtient ainsi un arbre hiérarchique des exigences, le niveau le plus bas (niveau 1) étant occupé par les exigences les plus générales.

L'arbre des exigences est disponible sur la figure [I.4](#). Sur cette figure, est rappelée la mission du projet, qui est en fait l'exigence de niveau 0. Les exigences ont un indicatif apposé du type : SR1 pour une exigence de niveau 1, SR1.1 pour une exigence de niveau 2 et SR1.1.1 pour une exigence de niveau 3. SR indique "stakeholders requirements" qui est l'indicatif anglais. Les exigences de niveau 1 sont les 7 exigences principales d'un projet Farwind :

- SR1 : produire de l'hydrogène à prix compétitif.
- SR2 : être un investissement sûr.
- SR3 : produire de l'hydrogène à la demande.
- SR4 : être bénéfique à la société.
- SR5 : être conforme aux permis et autorisations.
- SR6 : être conforme aux normes de sécurité.
- SR7 : pouvoir être mis en œuvre rapidement et à grande échelle.

Sur la figure on voit également apparaître sur le figure I.4 le degré de flexibilité des exigences (indiqué par la couleur de fond des encadrés). Celui-ci est noté de 1 (flexibilité importante) à 4 (aucune flexibilité). Comme il est difficile pour un projet de respecter toutes les exigences exprimées, le degré de flexibilité indique quelles exigences sont indispensables à la réussite du projet (exigences sans flexibilité indiquées en rouge) et quelles exigences sont souhaitables mais pas indispensables (exigences avec une grande flexibilité en vert).

Finalement, pour résumer complètement les exigences d'un projet Farwind, on ne gardera que les exigences de plus haut niveau disponible (exigences encadrées en rouge sur la figure I.4). La liste complète des 29 exigences est indiquée dans le tableau I.1.

Exigence	Description
SR1.1.1	Avoir un design bon marché
SR1.1.2	Être constructible à bas coût
SR1.2.1	Être automatisable
SR1.2.2	Être durable
SR1.2.3	Être fiable
SR1.3	Être un système à haut rendement
SR1.4.1	Être fiable
SR1.4.2	Être durable
SR1.5	Avoir un taux de financement bas
SR1.6	Avoir un taux d'assurance bas
SR2.1.1	Avoir peu d'incertitude sur le coût d'exploitation
SR2.1.2	Avoir peu d'incertitude sur le facteur de charge
SR2.1.3	Avoir peu d'incertitude sur la production d'hydrogène
SR2.1.4	Avoir peu d'incertitude sur le coût d'investissement
SR2.2.1	Être capable de survivre à des conditions météorologiques extrêmes
SR2.2.2	Être capable de faire face à une perte de communication
SR2.2.3	Être capable de survivre à une collision
SR3	Produire de l'hydrogène à la demande
SR4.1	Être bénéfique aux communautés locales
SR4.2	Être une source non polluante d'hydrogène
SR4.3	Avoir peu d'impact sur les contribuables et sur les utilisateurs d'hydrogène
SR4.4	Être recyclable
SR4.5	Contribuer à la sécurité énergétique
SR5.1	Être acceptable par les autres usagers
SR5.2	Être environnementalement acceptable
SR5.3	Être une source d'hydrogène compatible avec les spécifications du réseau
SR6.1	Être sûr pour les opérateurs
SR6.2	Être sûr pour les autres usagers de l'espace maritime
SR7	Pouvoir être mis en œuvre rapidement et à grande échelle

TABLE I.1 – Exigences à satisfaire pour un projet Farwind viable.

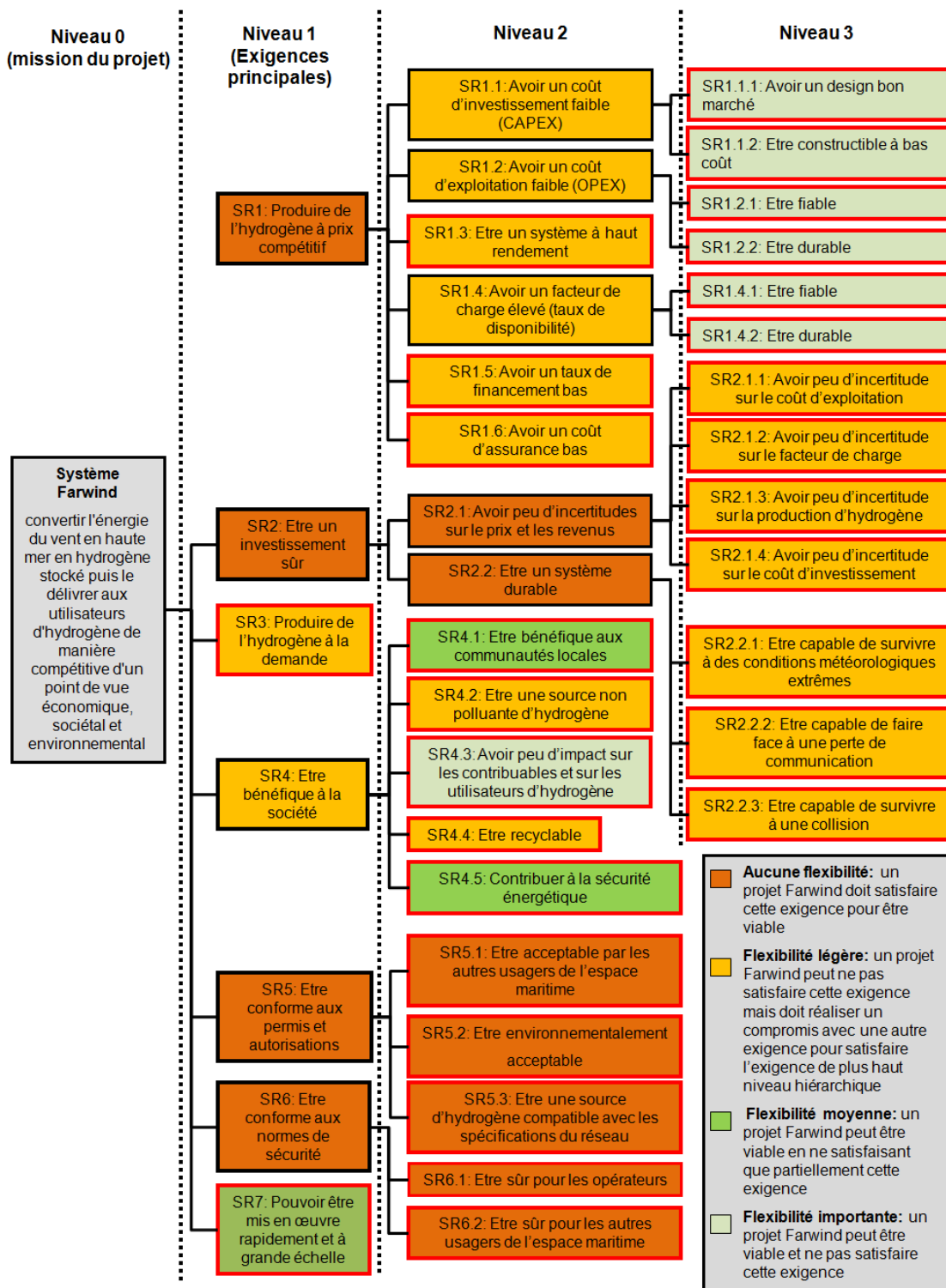


FIGURE I.4 – Arbre des exigences pour un projet Farwind viable. Les exigences encadrées en rouges sont les 29 exigences retenues. La couleur des encadrés indique le degré de flexibilité de l'exigence (voir légende sur la figure).

I.2 Étude de cas : choix technologique du système de propulsion éolien

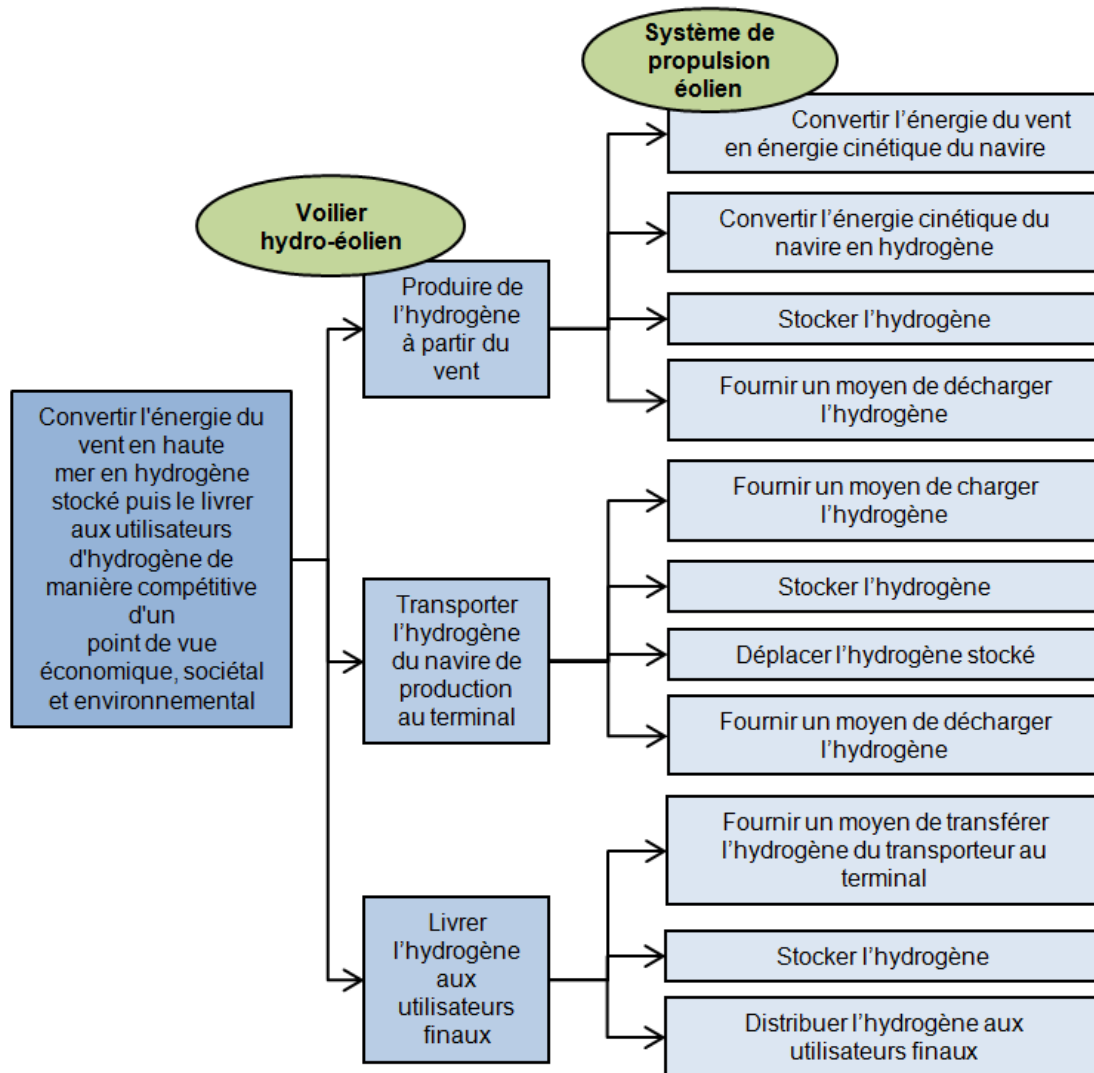


FIGURE I.5 – Fonctions remplies par le sous-système "propulsion éolienne" au sein du système "navire de production".

On réalise un cas d'application des outils décrits en première partie de ce chapitre. Le cas d'application est une continuité de l'exemple précédent d'un système Farwind. Le point de départ est l'arbre des exigences (voir figure I.4) ainsi que la liste des exigences à satisfaire pour un projet Farwind viable (voir tableau I.1). Ces deux éléments permettent de réaliser des choix technologiques en considérant l'impact de ces choix à l'échelle du projet. On réalise comme étude de cas, le choix technologique d'un sous-système majeur du voilier hydro-éolien : le système de propulsion éolienne. En effet, le choix de ce sous-système a un fort impact sur les performances et sur le design du navire. Ce choix doit être effectué avant la modélisation du navire et l'estimation de ses performances, qui est l'objet du chapitre II de cette thèse.

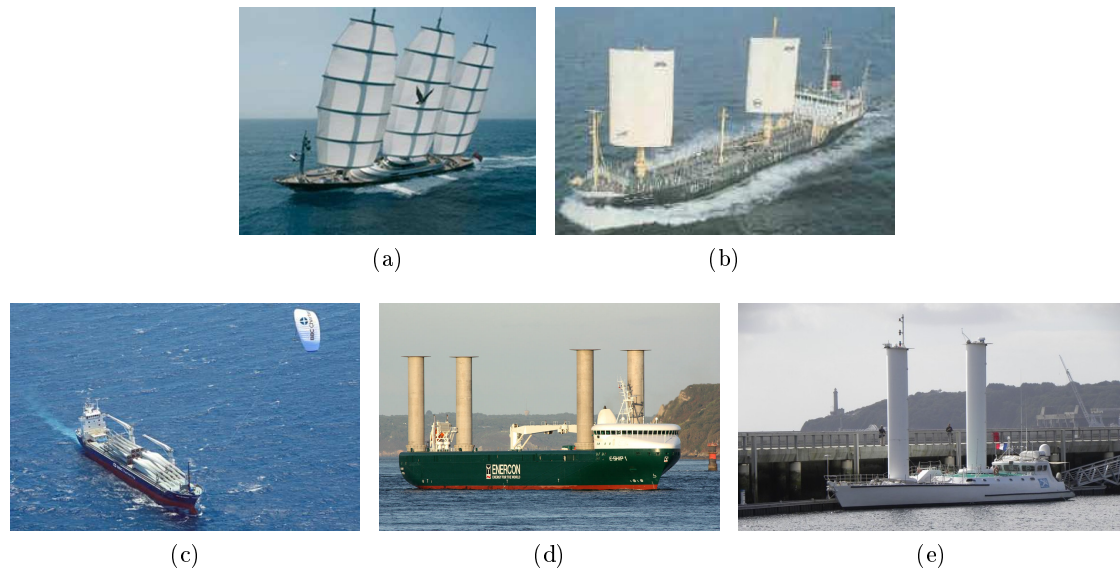


FIGURE I.6 – Les 5 technologies de propulsion étudiées : les voiles souples (a), les voiles rigides (b), les ailes de kite (c), les rotors Flettner (d) et les turbovoiles (e).

La description logique du système, rappelée sur la figure I.5 permet de situer ce sous-système dans son environnement. Il s'agit d'un sous-système du système "voilier hydro-éolien". Sa fonction est de convertir l'énergie du vent en énergie cinétique de la plate-forme.

La figure I.6 montre un aperçu des cinq technologies étudiées : les voiles souples, les voiles rigides, les ailes de kite, les rotors Flettner et les turbovoiles. La première sous-section présente les méthodes utilisés pour évaluer les technologies. La deuxième sous-section présente chaque technologie et son évaluation. Enfin, la dernière sous-section présente la conclusion de cet étude de cas.

I.2.1 Méthodes de l'étude de cas

I.2.1.1 Indicateurs de performance

On définit des indicateurs de performance permettant d'évaluer les exigences du projet. Les indicateurs peuvent être soit une valeur numérique, soit un court descriptif. Il y a des exigences qui ne concernent pas le système de propulsion du navire. Dans ce cas on indiquera la mention S.O. (sans objet). La liste complète des indicateurs de performance est disponible sur le tableau I.7 page 37. On présente ci-dessous quelques précisions sur le choix de ces indicateurs :

- **SR1.1.1 : Avoir un design bon marché.** Pour cette exigence on évalue d'une part le coût du système (coût des matériaux, composants les plus complexes) d'autre part son impact sur le coût du système. Ce dernier point est évalué avec le poids du système, son moment de chavirement, sa force de dérive, et la force développée en conditions extrêmes. Ces éléments impactent le dimensionnement du navire.
- **SR1.1.2 : Être constructible à bas coût.** On évalue la complexité du design par le besoin d'outils spécialisés pour sa construction.
- **SR1.2.1 : Être automatisable.** La possibilité d'automatisation est une caractéristique intrinsèque des systèmes étudiés.

- **SR1.2.2 : Être fiable.** Pour cette exigence et de la même manière pour les autres exigences similaires (voir plus bas dans cette liste), on évalue d'une part la possibilité d'une casse ou de la rupture d'un composant, d'autre par les conséquences d'un tel incident.
- **SR1.2.3 : Être durable.** La fiabilité des systèmes récents peut être difficile à obtenir. On évalue alors la maintenance nécessaire de ses composants principaux.
- **SR1.3 : Être un système à haut rendement.** Il s'agit de la performance du système de propulsion. Les données usuelles sont intéressantes pour cette évaluation (coefficient de portance, rapport portance sur traînée, consommation énergétique, poids). L'espace occupé sur le pont est également intéressant car il détermine le nombre d'éléments que l'on peut placer sur un navire d'une taille donnée.
- **SR1.4.1 : Être fiable.** Voir SR1.2.2.
- **SR1.4.2 : Être durable.** Voir SR1.2.3.
- **SR1.5 : Avoir un taux de financement bas.** s.o.
- **SR1.5 : Avoir un taux d'assurance bas.** s.o.
- **SR2.1.1 : Avoir peu d'incertitude sur le coût d'exploitation.** s.o.
- **SR2.1.2 : Avoir peu d'incertitude sur le facteur de charge.** s.o.
- **SR2.1.3 : Avoir peu d'incertitude sur la production d'hydrogène.** Le rapport de la portance sur la traînée a une influence mineure sur cette exigence. Il définit la capacité du système de propulsion à être efficace quel que soit l'angle du vent (au vent de travers comme au vent arrière ou au près), ce qui permet au navire de naviguer (et produire) dans des conditions de vent plus étendues et donc moins sujettes à incertitudes.
- **SR2.1.4 : Avoir peu d'incertitude sur le coût d'investissement.** Les composants complexes du système peuvent être source d'incertitude sur le coût de fabrication.
- **SR2.2.1 : Être capable de survivre à des conditions météorologiques extrêmes.** Le rapport entre la force aérodynamique en condition extrême (c'est-à-dire avec une vitesse de vent élevé) et la force aérodynamique nominale permet d'évaluer cette exigence.
- **SR2.2.2 : Être capable de faire face à une perte de communication.** s.o.
- **SR2.2.3 : Être capable de survivre à une collision.** s.o.
- **SR3 : Produire de l'hydrogène à la demande.** s.o.
- **SR4.1 : Être bénéfique aux communautés locales.** Un système avec une maintenance importante permettra plus de créations d'emplois locaux.
- **SR4.2 : Être une source non polluante d'hydrogène.** s.o.
- **SR4.3 : Avoir peu d'impact sur les contribuables et sur les utilisateurs d'hydrogène.** s.o.
- **SR4.4 : Être recyclable.** Le type de matériaux composant le système permet d'évaluer cette exigence.
- **SR4.5 : Contribuer à la sécurité énergétique.** s.o.
- **SR5.1 : Être acceptable par les autres usagers de l'espace maritime.** Pour répondre à cette exigence l'utilisation du système ne doit pas être gênante pour les autres usagers.
- **SR5.2 : Être environnementalement acceptable.** Pour répondre à cette exigence le système de propulsion ne doit pas être source de collision avec l'avifaune.
- **SR5.3 : Être une source d'hydrogène compatible avec les spécifications du réseau.** s.o.
- **SR6.1 : Être sûr pour les opérateurs.** Pour répondre à cette exigence le système doit pouvoir être arrêté et bloqué.
- **SR6.2 : Être sûr pour les autres usagers de l'espace maritime.** Pour répondre à cette exigence la force propulsive du système doit pouvoir être contrôlée efficacement.
- **SR7 : Pouvoir être mis en œuvre rapidement et à grande échelle.** s.o.

Exigences			Indicateurs de performance
SR1: Produire de l'hydrogène à prix compétitif	SR1.1: Avoir un coût d'investissement faible (CAPEX)	SR1.1.1: Avoir un design bon marché	Moment de chavirement Espace occupé sur le pont Nombre de composants du système Nombre de fournisseurs Quantité et prix des matériaux
		SR1.1.2: Etre constructible à bas coût	Besoin d'équipements et d'outillage spécialisés Besoin de travailleurs spécialisés Besoin d'infrastructures spécialisées
	SR1.2: Avoir un coût d'exploitation faible (OPEX)	SR1.2.1: Etre automatisable	Besoin d'opérateurs
		SR1.2.2: Etre fiable	Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants
		SR1.2.3: Etre durable	Durée de vie ou TRL des sous-systèmes et composants Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants
	SR1.3: Etre un système à haut rendement		Force propulsive générée Sensibilité de la force propulsive à l'angle du vent Rapport poids / force propulsive Consommation énergétique Force de dérive générée Controlabilité de la force propulsive
	SR1.4: Avoir un facteur de charge élevé (taux de disponibilité)	SR1.4.1: Etre fiable	Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants
		SR1.4.2: Etre durable	Durée de vie ou TRL des sous-systèmes et composants Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants
	SR1.5: Avoir un taux de financement bas		S.O.
	SR1.6: Avoir un coût d'assurance bas		S.O.
SR2: Etre un investissement sûr			Niveau de développement de la technologie (TRL level)
	SR2.1: Avoir peu d'incertitudes sur le prix et les revenus	SR2.1.1: Avoir peu d'incertitude sur le coût d'exploitation	Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants
		SR2.1.2: Avoir peu d'incertitude sur le facteur de charge	Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants
		SR2.1.3: Avoir peu d'incertitude sur la production d'hydrogène	Sensibilité de la force propulsive à la vitesse du vent Sensibilité de la force propulsive à l'angle du vent
		SR2.1.4: Avoir peu d'incertitude sur le coût d'investissement	Nombre de fournisseurs
	SR2.2: Etre un système durable	SR2.2.1: Etre capable de survivre à des conditions météorologiques extrêmes	Conséquence de la rupture d'un composant en condition extrême
		SR2.2.2: Etre capable de faire face à une perte de communication	S.O.
SR2.2.3: Etre capable de survivre à une collision		S.O.	
SR3: Produire de l'hydrogène à la demande		S.O.	
SR4: Etre bénéfique à la société	SR4.1: Etre bénéfique aux communautés locales		Création d'emploi (par exemple pour la maintenance)
	SR4.2: Etre une source non polluante d'hydrogène		S.O.
	SR4.3: Avoir peu d'impact sur les contribuables et sur les utilisateurs d'hydrogène		S.O.
	SR4.4: Etre recyclable		Recyclabilité des composants et matériaux Durée de vie des composants
	SR4.5: Contribuer à la sécurité énergétique		S.O.
SR5: Etre conforme aux permis et autorisations	SR5.1: Etre acceptable par les autres usagers de l'espace maritime		Conflits d'usage
	SR5.2: Etre environnementalement acceptable		Risque de collision avec l'avifaune
	SR5.3: Etre une source d'hydrogène compatible avec les spécifications du réseau		S.O.
SR6: Etre conforme aux normes de	SR6.1: Etre sûr pour les opérateurs		Possibilité de bloquer le système
	SR6.2: Etre sûr pour les autres usagers de l'espace maritime		Contrôlerapide et efficace de la force propulsive
SR7: Pouvoir être mis en œuvre rapidement et à grande échelle		S.O.	

FIGURE I.7 – Indicateurs de performance pour l'évaluation du sous-système "propulsion éolienne".

I.2.1.2 Évaluation des indicateurs de performance

Pour évaluer les indicateurs de performance, on sélectionne les conditions dans lesquelles le navire est supposé évoluer. Cet ensemble de conditions permet de définir un cadre précis dans lequel on compare les résultats numériques obtenus par chaque technologie. L'allure sélectionnée (c'est-à-dire la direction du vent) est le vent de travers (le vent arrive de travers au navire c'est-à-dire pour $TWA = 90^\circ$) car c'est une allure optimale de la plupart des propulsions éoliennes. Cette allure permet également à un navire d'effectuer un aller retour sans devoir naviguer contre le vent (avec l'hypothèse d'un vent constant en direction). La vitesse de vent 10 m/s est considérée comme vitesse de vent nominale. Elle correspond à une vitesse de vent courante dans la zone de production souhaitée (5; 23). Afin de prendre en compte les différences de hauteur des systèmes, on prend en compte le gradient de vent en fonction de la hauteur (95).

Chaque profil est défini par ses coefficients aérodynamiques (coefficient de portance et coefficient de traînée) issus de la littérature. A partir de ces coefficients on calcule l'envergure d'un système capable de fournir une force propulsive de 100 kN. On calcule ensuite les valeurs nécessaires à l'évaluation des indicateurs.

Valeur	Unité
Hauteur du profil	m
Largeur du profil	m
Consommation énergétique	% de la puissance de propulsion
Force de dérive	% de la force propulsive
Moment de chavirement	kNm
Force propulsive avec $TWA = 60^\circ$	% de la force propulsive
Force propulsive avec $TWA = 120^\circ$	% de la force propulsive

TABLE I.2 – Liste des valeurs à calculer.

I.2.1.3 Détail des calculs réalisés

Les valeurs à calculer sont décrites dans le tableau I.2. Le déplacement de l'air est décrit par deux vecteurs, le vecteur de vent réel (\vec{U}_{TW} pour "True Wind") et le vecteur de vent apparent (\vec{U}_{AW} pour "Apparent Wind"). Le vent réel est le déplacement de l'air par rapport à un repère fixe. Le vent apparent est le déplacement de l'air par rapport au repère du navire. Le vent apparent est donc la soustraction du vecteur de déplacement du navire au vecteur de vent réel (figure I.8 et équation (I.1)). Leurs angles sont respectivement TWA pour le vent réel ("True Wind Angle") et AWA pour le vent apparent ("Apparent Wind Angle"). L'angle du vent est mesuré à partir de la direction d'avance du navire (navire face au vent $TWA = 0^\circ$, navire vent de travers $TWA = 90^\circ$). Le déplacement vertical de l'air est négligé. On décrit donc les vecteurs de vent apparent et de vent réel dans le plan (x, y) (I.2). La portance et la traînée sont calculés à l'aide des coefficients de portance et de traînée selon la formule (I.3). Les coefficients aérodynamiques de portance C_L et de traînée C_D sont extraits des études bibliographiques.

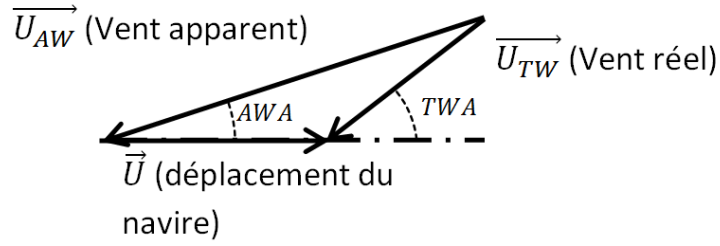


FIGURE I.8 – Le vecteur vent apparent \vec{U}_{AW} est la soustraction du vecteur déplacement du navire \vec{U} au vecteur vent réel \vec{U}_{TW} .

$$\vec{U}_{AW} = \vec{U}_{TW} - \vec{U} \quad (I.1)$$

$$\begin{cases} AWS &= \sqrt{U^2 + (TWS)^2 + 2U(TWS)\cos(TWA)} \\ \sin(AWA) &= \frac{TWS}{AWS}\sin(TWA) \end{cases} \quad (I.2)$$

$$\begin{cases} F_L &= \frac{1}{2}\rho_{air}A_R(AWS)^2C_L \\ F_D &= \frac{1}{2}\rho_{air}A_R(AWS)^2C_D \end{cases} \quad (I.3)$$

avec F_L la portance du profil, F_D la trainée du profil, ρ_{air} la masse volumique de l'air.

Comme indiqué sur la figure I.9, on projette la portance et la trainée sur l'axe d'avance du navire \vec{x} pour obtenir la force propulsive F_{prop} , et sur l'axe transversal \vec{y} pour obtenir la force de dérive F_{der} . On obtient ainsi les forces propulsives et de dérive en fonction des paramètres du vent incident (I.4).

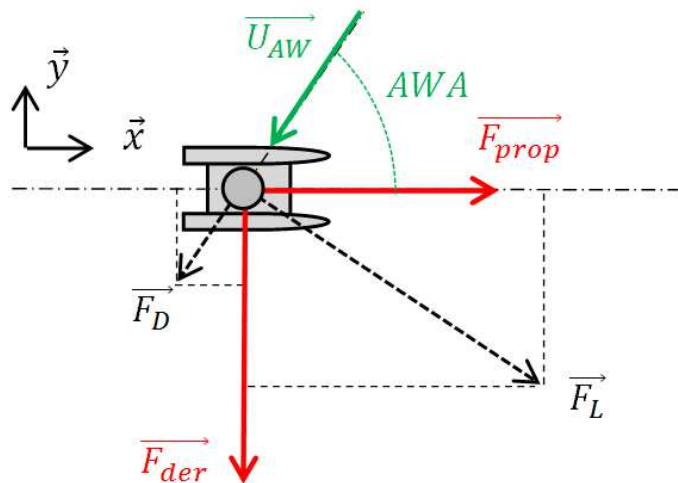


FIGURE I.9 – Schéma du navire vu de dessus (plan (x, y)). La portance et la trainée sont projetées sur les axes \vec{x} et \vec{y} pour obtenir la force propulsive F_{prop} et la force de dérive F_{der} .

$$\begin{cases} F_{prop} &= \frac{1}{2} \rho_{air} A_R (AWS)^2 (C_L \sin(AWA) - C_D \cos(AWA)) \\ F_{der} &= \frac{1}{2} \rho_{air} A_R (AWS)^2 (C_L \cos(AWA) + C_D \sin(AWA)) \end{cases} \quad (I.4)$$

On prend ensuite en compte le profil du vent en fonction de la hauteur. On suppose que le bas du système (au niveau du pont du navire) est situé à 2 m au dessus du niveau de l'eau. Les interactions entre la coque du navire et le flux incident ne sont pas pris en compte. Le profil de vent réel utilisé est celui couramment utilisé pour les éoliennes en mer tel que décrit dans la norme IEC 61400-3 (24) (I.5). On calcule ensuite le vent apparent résultant grâce à l'équation (I.6). On obtient ainsi le profil du vent apparent en fonction de la hauteur z . Pour un vent en mer, la valeur usuelle du coefficient α est de 0,14 (24). Le profil du vent apparent dans les conditions sélectionnées (vent réel de 10 m/s et d'angle 90° , vitesse d'avance de 7,7 m/s) est indiqué sur la figure I.10.

$$TWS(z) = TWS_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad (I.5)$$

$$AWS(z) = \sqrt{U^2 + (TWS_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha)^2 + 2U * (TWS_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha) \cos(TWA)} \quad (I.6)$$

avec TWS_{ref} la vitesse du vent réel à l'altitude z_{ref} .

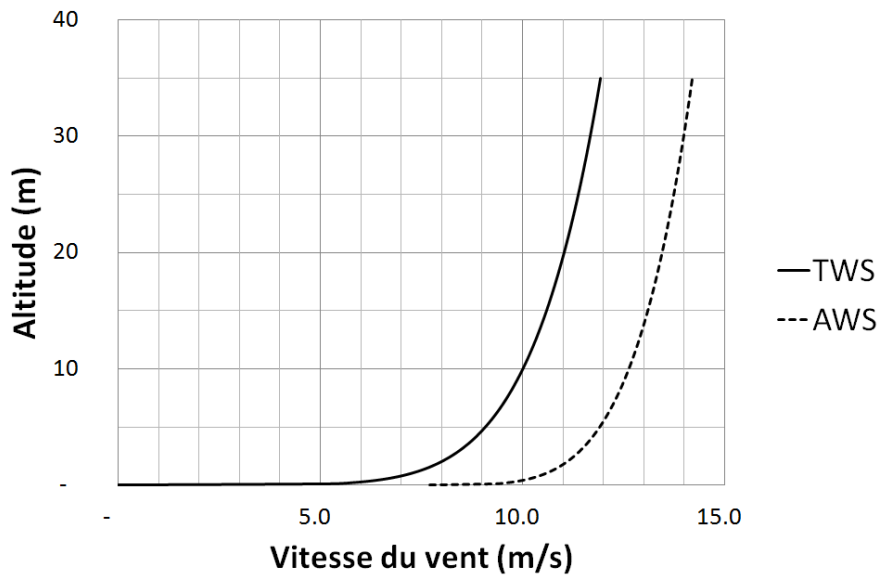


FIGURE I.10 – Vitesse du vent réel (trait plein) et du vent apparent (trait pointillé) en fonction de l'altitude. Avec $U = 10.0\text{m/s}$, $TWS_{ref}(10\text{m}) = 10.0\text{m/s}$ et $TWA = 90.0$.

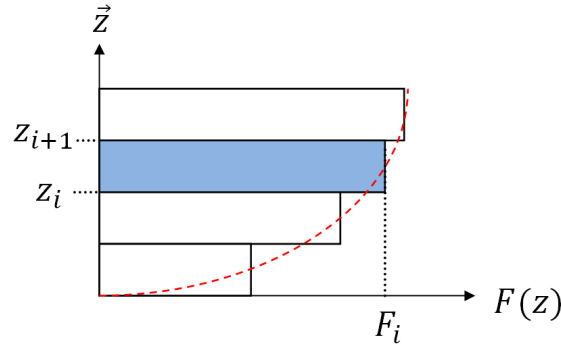


FIGURE I.11 – Courbe de la résultante aérodynamique $F(z)$ en fonction de la hauteur ; représentation des tranches correspondantes.

On utilise la méthode des tranches pour calculer chaque valeur nécessaire. On discrétise le profil suivant la hauteur en tranches comme indiqué sur le schéma I.11. Par exemple, pour le calcul de la résultante aérodynamique, F_{aero} , à chaque tranche, délimitée par la hauteur $z = i$ et $z = i + 1$, on associe la résultante aérodynamique F_i . Comme indiqué dans l'équation (I.7), la résultante F_i est calculée en prenant en compte le vent moyen de la tranche correspondante : $AWS(\frac{z_i + z_{i+1}}{2})$. La valeur totale de la résultante est ensuite la moyenne des forces F_i (I.8).

$$F_i = \frac{1}{2} \rho_{air} A_R (AWS(\frac{z_i + z_{i+1}}{2}))^2 \sqrt{C_L^2 + C_D^2} \quad (I.7)$$

$$F_{aero} = \frac{\sum_i (F_i)}{\sum_i (i)} \quad (I.8)$$

On calcule la hauteur du centre vélique, c'est-à-dire le point d'application de la résultante aérodynamique, par l'équation (I.9). Le moment de chavirement est le couple engendré par la force aérodynamique sur l'axe de gîte du navire. Le centre de rotation du navire (défini par la forme de la carène) est encore inconnu. On le suppose alors situé au niveau de la surface de l'eau. Le moment de chavirement s'écrit alors (I.10).

$$z_C = \frac{\sum_i (F_i * (\frac{z_i + z_{i+1}}{2}))}{\sum_i F_i} \quad (I.9)$$

$$M(\vec{F}_{der}) = z_C * F_i \quad (I.10)$$

Notes et moyennes obtenues Sur la base de l'évaluation réalisée pour chaque indicateur on définit une note entre 1 et 3, 3 étant la meilleure note et 1 la plus basse. On calcule ensuite deux moyennes différentes. Tout d'abord la moyenne du résultat obtenu pour chaque indicateur de performance puis la moyenne pondérée en rapport avec les exigences du projet de niveau 2 (SR1.1, SR1.2, etc). L'élaboration d'une pondération précise est délicate à réaliser et sujette à interprétation. On remarque cependant que le nombre d'indicateurs de performances pour chaque exigence reflète l'importance du système de propulsion éolienne pour cet exigence. On choisit alors de pondérer la moyenne en fonction du nombre d'indicateurs évalués (un point pour chaque indicateur).

I.2.2 Résultats

On évalue cinq technologies de propulsion éolienne : les voiles souples, les voiles rigides, les turbo-voiles, les ailes de kite et les rotors Flettner. Pour chaque technologie on présente un descriptif de la technologie et l'évaluation des indicateurs de performance. Enfin, en fin de partie une comparaison des résultats obtenus permet de définir quelle technologie peut être sélectionnée pour une application sur le voilier hydro-éolien.

I.2.2.1 Voiles souples

La technologie des voiles souples est ancienne et de nombreux exemples d'applications existent. Dans le cadre de cette étude, on se limitera aux quelques systèmes à voiles souples qui sont automatiques ou semi-automatiques.

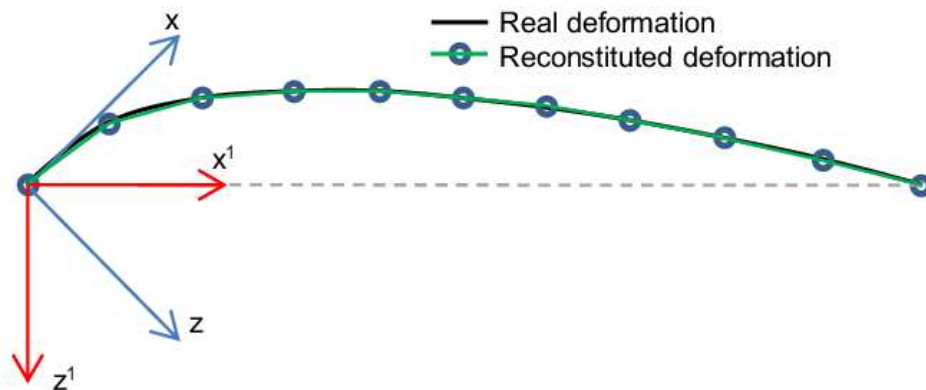


FIGURE I.12 – Exemple de profil courbé et fin d'une voile souple réalisé en conditions expérimentales (25).

Un système de voiles souples comporte une armature solide, le gréement, composé d'un ou plusieurs mats, de câbles et d'espars¹, sur lequel sont fixées des voiles. Les voiles sont généralement en matériaux tissés et peuvent être pliées ou roulées à volonté. Une voile souple en fonctionnement est un profil portant courbé et très fin (voir exemple de profil figure I.12). Sa souplesse lui permet d'adopter une forme différente en fonction de son incidence (la voile change de courbure suivant que le vent incident vienne d'un côté ou de l'autre du profil). La souplesse de la voile permet l'adaptation de la surface portante aux conditions extérieures : on peut plier ou ranger une partie de la surface en fonction de la vitesse du vent (cela correspond à la manœuvre "prendre un ris", voir une exemple sur la photo I.13a). Cette particularité est également utile lors de l'arrêt du système. Il est en effet possible de plier, enrouler ou ranger totalement une voile souple, ne laissant apparent que le gréement (voir exemple photo I.13b).

Des concepts de voiliers automatisés sont apparus dès les années 1960 avec des navires de commerce équipés de voiles "Cat-rig"² (26) (voir exemple photo I.14a). Le système Cat-rig consiste en une voile supportée par un mât et une bôme.

Le système Dynarig est un autre exemple de système automatisé (27; 28; 29). Il s'agit d'un

1. On appelle espar les poutres d'un gréement. Sont compris dans les espars les mats, bômes, livardes, etc.
2. Le terme anglais "rig" signifie gréement et est couramment utilisé pour désigner le nom d'un système à voiles souples comme c'est le cas pour les systèmes "Cat-rig", "Dynarig", etc.

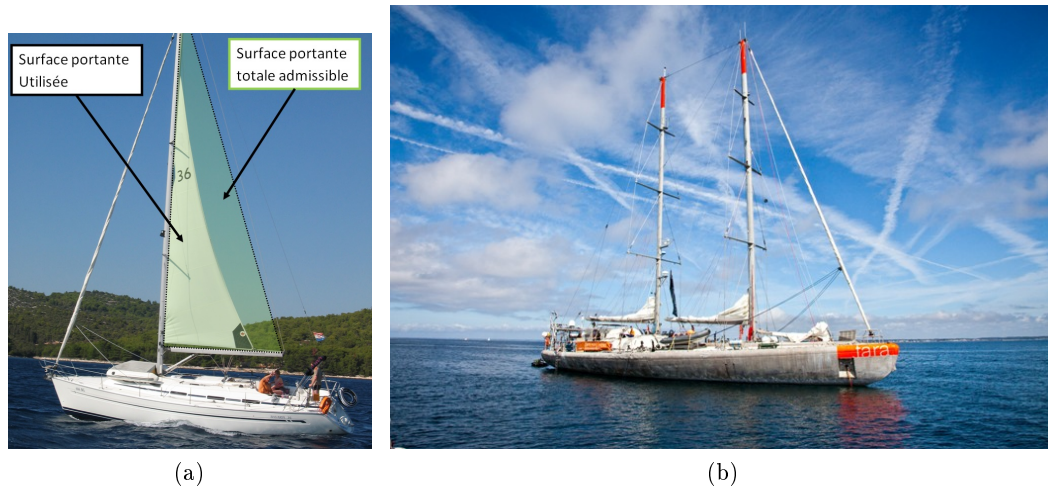


FIGURE I.13 – Réglages et gréement des voiles souples. A gauche : une partie de la voile de ce voilier a été enroulée dans le mat pour réduire sa surface portante. A droite : la structure du système de voiles souples à l'arrêt du navire Tara (mâts, câbles et espars).

ensemble de voiles rectangulaires portées sur un mât. La voile est fixée en haut et en bas sur des espars horizontaux. Elle peut être enroulée à l'intérieur du mât. Un exemple d'application de ce système est le navire "Faucon Maltais" équipé de trois mâts Dynarig (voir photo I.14b) (30).

Enfin, on peut également citer le système Aerorig (31). Sur ce système, le gréement consiste en un ensemble rigide mât-bôme qui porte deux voiles souples (une à l'avant du mât et une à l'arrière du mât). La rigidité du gréement permet par la seule rotation du mât de faire tourner l'ensemble du gréement.

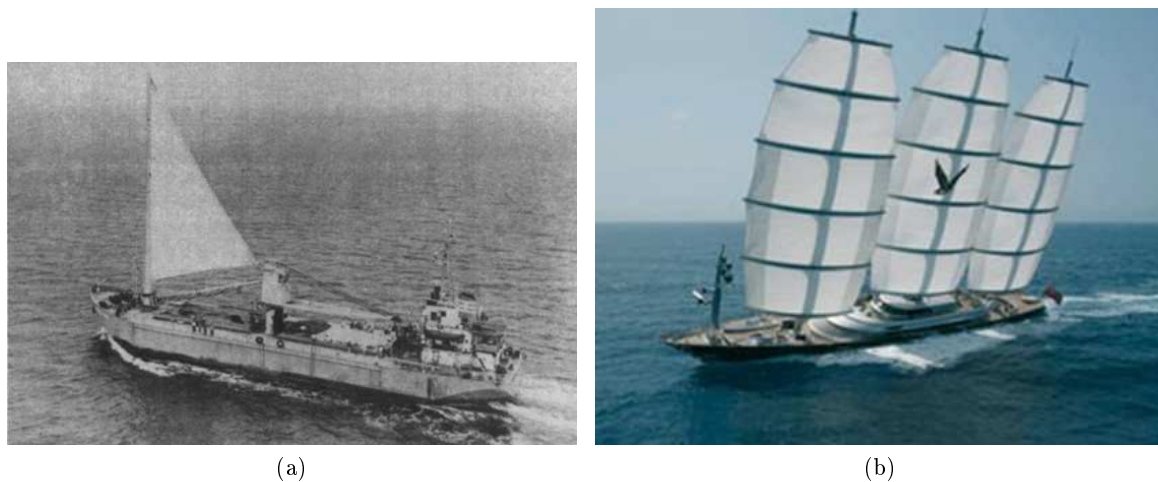


FIGURE I.14 – A gauche : photo du navire "Mini lace" équipé d'un gréement cat-rig (32) ; A droite le "Faucon Maltais" et son gréement de type Dynarig.

Évaluation des indicateurs On réalise le calcul des indicateurs de performance pour les voiles souples. Des études expérimentales ont montré que pour des gréements classiques (c'est-à-dire mât fixe et voiles souples orientables), la plage de coefficient de portance est comprise entre 0,6 et 1,3 (33; 34). Il peut parfois atteindre 1,4 dans des cas particuliers (par exemple utilisation de la voile spécifique "spinnaker"³). Les études montrent également que la valeur des coefficients est fortement dépendante du type de voiles utilisées. Dans (35), on trouve un coefficient de portance maximum de 1,5 pour un coefficient de traînée de 0,4. Le coefficient de traînée varie généralement de 0 à 0,6, le plus souvent dans la plage [0;0,4]. Pour le système Dynarig, les études expérimentales montrent un coefficient de portance de 1,2 pour un coefficient de traînée de 0,3 (36).

Les coefficients de portance et de traînée retenus sont respectivement 1,2 et 0,3. Dans les conditions d'évaluations définies I.2.1.2, il faut une surface de 570 m² pour produire une force propulsive de 100kN (soit une surface de voile de 15 m par 38,5 m). Les valeurs principales qui en découlent sont détaillées dans le tableau I.3.

Paramètre	Valeur	Unité
Coefficient de portance retenu	1,2	
Coefficient de traînée retenu	0,3	
Hauteur du profil	46	m
Largeur du profil	15	m
Consommation énergétique	0	% de la puissance de propulsion
Force de dérive	110%	% de la force propulsive
Moment de chavirement	3000	kNm
Force propulsive avec TWA = 60°	53%	% de la force propulsive
Force propulsive avec TWA = 120°	73%	% de la force propulsive

TABLE I.3 – Paramètres principaux des voiles souples.

Pour le calcul de la force propulsive avec un angle de vent réel de 60°, le moment de chavirement obtenu est très élevé (5570 kNm alors que le moment de chavirement nominal est estimé à 3000 kNm). Il paraît donc incohérent de garder cette valeur, les voiles devant être adaptées à la stabilité du navire. On choisit donc pour ce paramètre de garder la valeur qui ne dépasse pas le moment de chavirement initial. On prend également l'hypothèse que la surface portante peut être réduite en partant du haut de la voile. Ainsi, avec une voile ne mesurant que 37,5 m de haut on obtient une force propulsive de 53 kN et un moment de chavirement nominal (de 3000 kNm).

L'évaluation des indicateurs de performance est détaillée dans le tableau I.15. Le tableau I.16 présente ensuite la note obtenue pour chaque indicateur et pour chaque exigence de niveau 2. Les voiles souples obtiennent pour les indicateurs une note moyenne de 2,38. La moyenne pondérée est identique.

3. Le spinnaker est une voile de grande surface spécifique au vent arrière. Sa grande surface et sa plage d'angle d'utilisation réduite la rendent compatible avec un système automatique.

Evaluation des voiles souples					
SR	Indicateur de performance	Note	Description/justification		
1	Moment de chavirement	1	Profil haut (46 m) et point centre vélique élevé, moment de chavirement de 3000 kN, certains profils en triangle permettent d'abaisser la hauteur du centre vélique et le moment de chavirement		
	Espace occupé sur le pont	1	La grande surface portante demandée occupe une large surface sur le pont (largeur 15 m)		
	1	Nombre de composants du système	2	Mâts et gréements, pièces mécaniques mobiles, voiles	
	1	Nombre de fournisseurs	2	Peu de fournisseurs pour les systèmes étudiés (systèmes automatiques)	
	1	Quantité et prix des matériaux	3	Matériaux connus pour le gréement (aluminium) et les voiles (tissu spécialisé), grand nombre de fournisseurs	
	2	Besoin d'équipements et d'outillage spécialisés	3	construction mécanique uselle (structure aluminium et pièces mécaniques), assemblage final spécifique	
	2	Besoin de travailleurs spécialisés	3	construction mécanique uselle (structure aluminium et pièces mécaniques), assemblage final spécifique	
	2	Besoin d'infrastructures spécialisées	2	Structure de 46 m de haut	
	1	Besoin d'opérateurs	3	Peut être entièrement automatisé	
	2	Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants	3	Matériaux connus pour le gréement (aluminium) et les voiles (tissu spécialisé)	
	2	Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	3	Les voiles peuvent être changés, le remplacement du gréement demande le démontage complet du système	
	3	Durée de vie ou TRL des sous-systèmes et composants	2	Le gréement est connu et a une bonne durée de vie, les voiles une durée de vie plus faible	
	3	Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	3	Les voiles peuvent être changés, le remplacement du gréement demande le démontage complet du système	
	3	Force propulsive générée	1	Coefficient de portance faible (1,2)	
	3	Sensibilité de la force propulsive à l'angle du vent	2	Force propulsive de 53% à 60° et de 73% à 120°	
	3	Rapport poids / force propulsive	3	Structure de poids moyen, voiles légère	
	3	Consommation énergétique	3	Pas de consommation d'énergie	
	3	Force de dérive générée	1	110% de force de dérive générée	
	3	Controlabilité de la force propulsive	3	L'orientation du profil permet de modifier la force propulsive, la surface portante est adaptable à la vitesse du vent	
	4	1	Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants	3	Matériaux connus pour le gréement (aluminium) et les voiles (tissu spécialisé)
	4	2	Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	2	Les voiles peuvent être changés, le remplacement du gréement demande le démontage complet du système
4	2	Durée de vie ou TRL des sous-systèmes et composants	2	Le gréement est connu et a une bonne durée de vie, les voiles une durée de vie plus faible	
4	2	Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	3	Les voiles peuvent être changés, le remplacement du gréement demande le démontage complet du système	
2	1	Niveau de développement de la technologie	3	TRL de 9, plusieurs exemples en application	
2	1	Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants	3	Matériaux connus pour le gréement (aluminium) et les voiles (tissu spécialisé)	
2	1	Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	2	Les voiles peuvent être changés, le remplacement du gréement demande le démontage complet du système	
2	2	Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants	3	Matériaux connus pour le gréement (aluminium) et les voiles (tissu spécialisé)	
2	4	Sensibilité de la force propulsive à l'angle du vent	2	Force propulsive de 53% à 60° et de 73% à 120°	
2	4	Nombre de fournisseurs	2	Peu de fournisseurs pour les systèmes étudiés (systèmes automatiques)	
2	1	Conséquence de la rupture d'un composant en condition extrême	1	Le non-fonctionnement du système de pliage peut mener à une surcontrainte au niveau de la fixation de la voile et endommager le système et le navire	
4	1	Création d'emploi (par exemple pour la maintenance)	2	Des opérations de maintenance peuvent nécessiter une maintenance au port	
4	4	Recyclabilité des composants et matériaux	3	La structure métallique est recyclable, les voiles sont difficilement recyclables mais des exemples de réutilisation existent	
4	4	Durée de vie du système et de ses composants	2	Le gréement est connu et a une bonne durée de vie, les voiles une durée de vie plus faible	
5	1	Conflits d'usage	3	Pas de conflit spécifique	
5	2	Risque de collision avec l'avifaune	3	Pas de risque de collision	
6	1	Possibilité de bloquer le système	2	Le système peut être bloqué mais la force propulsive n'est alors plus contrôlable	
6	2	Contrôlerapide et efficace de la force propulsive	3	La rotation du profil permet de contrôler la force propulsive	

FIGURE I.15 – Indicateurs de performance pour l'évaluation des voiles souples.

SR		Indicateur de performance	Voiles souples			
1	1	Moment de chavirement	2.1	1		
		Espace occupé sur le pont		1		
		Nombre de composants du système		2		
		Nombre de fournisseurs		2		
		Quantité et prix des matériaux		3		
	2	Besoin d'équipements et d'outillage spécialisés		3		
		Besoin de travailleurs spécialisés		3		
		Besoin d'infrastructures spécialisées		2		
	2	1		2.8	3	
		2			3	
		2			3	
		3			2	
	3	3		2.2	3	
					Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants	3
					Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	3
					Durée de vie ou TRL des sous-systèmes et composants	2
					Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	3
					Force propulsive générée	1
	4	4		2.5	3	
					3	
2	1	2.5	2			
			Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	2		
			Durée de vie ou TRL des sous-systèmes et composants	2		
			Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	3		
			Niveau de développement de la technologie	3		
			1	3		
2	1	1.0	1			
			2	2		
4	4	2.5	3			
			2	2		
5	1	3.0	3			
			2	3		
6	1	2.0	2			
			2	3		
Moyenne générale			2.38	2.38		

FIGURE I.16 – Notes obtenues par les voiles souples aux indicateurs de performance et aux exigences de niveau 2.

I.2.2.2 Voiles rigides

Présentation de la technologie Les systèmes de propulsion à voiles rigides sont inspirés des systèmes de voiles souples. Ils sont composés d'un gréement sur lequel sont fixés des panneaux rigides, parfois articulés (les voiles rigides). Le profil de ces voiles peut être fin ou épais. Dans le cas de profils épais, il peut être composé de plusieurs éléments articulés permettant de régler la courbure générale du profil. C'est par exemple le cas du profil figure I.17a (37) qui est composé de deux profils NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) articulés entre eux par une liaison pivot.

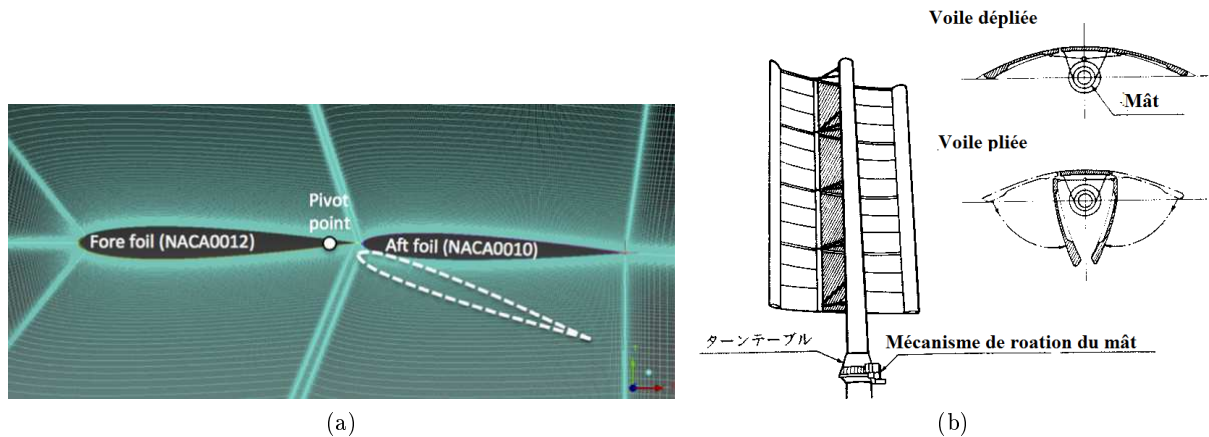


FIGURE I.17 – Deux exemples de profils de voiles rigides : à gauche une voile composée de deux profils NACA articulés (37), à droite un profil de voile rigide fine (38).

Comme pour les voiles souples, il est nécessaire de pouvoir réduire la surface portante lorsque la voile n'est pas en fonctionnement. Plusieurs méthodes existent pour cela. Certains systèmes ont des éléments pliables (voir figure I.17b) alors que d'autres sont intégralement rétractables (voir figure I.18b).



FIGURE I.18 – A gauche : le système à voile rigide "Jamada" sur le navire "Shin-Aitoku-Maru" (38) ; A droite : Le système à voiles rigides du projet Wind Challenger lors d'essais à terre.

En 1980, le système à voiles rigides Jamada a équipé deux navires afin de réaliser des essais (38; 39). Le navire de commerce "Shin-Aitoku-Maru" (figure I.18a) et 17 autres navires ont été équipés de ce système et utilisés commercialement. A l'occasion de la coupe de l'America, un système hybride de voiles souples et rigides a été développé. Toutefois ce système qui maximise les performances au détriment d'autres facteurs (coût d'investissement, fiabilité) est peu adapté pour la navire de production. D'autres systèmes mêlant voiles souples et voiles rigides existent (40). Enfin, le projet "Wind Challenger" a permis le développement d'un système à voile rigides (41; 42). Celui-ci est composé de panneaux épais rétractables entre eux. Il n'est pas encore équipé sur des navires mais des expérimentations à l'échelle 1/2,5 ont été réalisées (figure I.18b). Le système Wind Challenger a fait l'objet d'une proposition pour équiper un navire de production (43)

Évaluation des indicateurs On réalise le calcul des indicateurs de performance pour les voiles rigides. La simulation numérique en CFD de 3 profils épais articulés montre que le coefficient de portance de 1 à 1,4 sur la plage d'incidence adaptée (44). Le coefficient de traînée peut être très réduit avec un rapport traînée/portance pouvant monter jusqu'à 12. Pour des voiles à deux profils articulés il est même possible d'augmenter ce rapport jusqu'à 100 à 140 (45) (obtenu avec un coefficient de portance de 1,5 et un coefficient de traînée inférieur à 0,05). Ces résultats démontrent une grande performance mais sont à nuancer par les coefficients obtenus par d'autres profils de voiles rigides. On note ainsi couramment des coefficients de portance de 1 à 1,4 pour des coefficients de traînée de 0,1 à 0,4 (46; 47; 48; 49).

Pour les besoins du calcul on retiendra un coefficient de portance de 1,4 et un coefficient de traînée de 0,1. Bien que ces valeurs ne soient pas réellement une moyenne au sens strict, elles permettent de montrer que les voiles rigides possèdent pour la plupart des coefficients aérodynamiques légèrement meilleurs que les voiles souples (dont les coefficients étaient 1,2 et 0,3). Les valeurs nécessaires à l'évaluation des indicateurs de performances sont détaillées dans le tableaux I.4.

L'évaluation des indicateurs de performance est détaillée dans le tableau I.19. Le tableau I.20 présente la note obtenue pour chaque indicateur et pour chaque exigence de niveau 2. Les voiles souples obtiennent pour les indicateurs une note moyenne de 2,20. La moyenne pondérée est de 2,08.

Paramètre	Valeur	Unité
Coefficient de portance retenu	1,4	
Coefficient de traînée retenu	0,1	
Hauteur du profil	40,5	m
Largeur du profil	15	m
Consommation énergétique	0	% de la puissance de propulsion
Force de dérive	79%	% de la force propulsive
Moment de chavirement	1970	kNm
Force propulsive avec TWA = 60°	59%	% de la force propulsive
Force propulsive avec TWA = 120°	66%	% de la force propulsive

TABLE I.4 – Paramètres principaux des voiles rigides.

Evaluation des voiles rigides					
SR	Indicateur de performance	Note	Description/justification		
1	Moment de chavirement	2	Profil haut (40,5 m) et point centre vélique élevé, moment de chavirement faible (1970 kN) au vent de travers mais qui peut être élevé aux autres allures		
	Espace occupé sur le pont	1	La grande surface portante demandée occupe une large surface sur le pont (largeur 15 m)		
	1	Nombre de composants du système	1	Mats, systèmes de rotation, panneaux pliables, roulements et moteurs pour chaque panneau	
		Nombre de fournisseurs	2	Technologie émergente avec peu de fournisseurs	
	2	Quantité et prix des matériaux	3	Structure en matériaux composite ou aluminium,	
		Besoin d'équipements et d'outillage spécialisés	3	Matériaux et types de montage connus	
		Besoin de travailleurs spécialisés	1	Montage mécanique, mise en forme des matériaux composites	
	2	Besoin d'infrastructures spécialisées	2	Structure de 40,5 m de haut	
		1	Besoin d'opérateurs	3	Peut être entièrement automatisé
		2	Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants	2	Composants et matériaux connus
		2	Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	1	Certains panneaux peuvent demander le démontage du système pour être accessible
		3	Durée de vie ou TRL des sous-systèmes et composants	2	Composants et matériaux fiables (composite, pièces mécaniques)
		3	Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	1	Certains panneaux peuvent demander le démontage du système pour être accessible
	3	Force propulsive générée	1	Coefficient de portance faible (1,4), légèrement plus élevé que pour les voiles souples	
		Sensibilité de la force propulsive à l'angle du vent	3	Force propulsive de 59% à 60° et de 66% à 120°	
		Rapport poids / force propulsive	3	Structure légère et creuse en matériaux composites ou aluminium	
		Consommation énergétique	3	Pas de consommation énergétique hormis pour la mise en place et le pliage du système	
		Force de dérive générée	2	79% de dérive générée	
		Contrôlabilité de la force propulsive	3	Force propulsive de 59% à 60° et de 66% à 120°	
	4	1	Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants	2	Composants et matériaux connus
		2	Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	1	Certains panneaux peuvent demander le démontage du système pour être accessible
2		Durée de vie ou TRL des sous-systèmes et composants	2	Composants et matériaux fiables (composite, pièces mécaniques)	
2	1	1	Niveau de développement de la technologie	3	TRL de 9, plusieurs exemples d'application et systèmes différents
		2	Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants	2	Composants et matériaux connus
		2	Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	1	Certains panneaux peuvent demander le démontage du système pour être accessible
		2	Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants	2	Composants et matériaux fiables (composite, pièces mécaniques)
	4	Sensibilité de la force propulsive à l'angle du vent	3	Force propulsive de 59% à 60° et de 66% à 120°	
2	1	Nombre de fournisseurs	2	Technologie émergente avec peu de fournisseurs	
4	1	1	Conséquence de la rupture d'un composant en condition extrême	1	Le non-fonctionnement du système de pliage peut mener à une surcontrainte au niveau de la fixation de la voile et endommager le système et le navire
		2	Création d'emploi (par exemple pour la maintenance)	2	Certaines opérations de maintenance peuvent nécessiter le retour à quai du navire
		4	Recyclabilité des composants et matériaux	2	Variable en fonction des matériaux choisis (matériaux composites, aluminium)
5	1	2	Durée de vie du système et de ses composants	3	Composants et matériaux fiables (composite, pièces mécaniques)
		2	Conflits d'usage	3	Pas de conflit spécifique
6	1	2	Risque de collision avec l'avifaune	3	Pas de risque de collision
		2	Possibilité de bloquer le système	2	Le système peut être bloqué mais la force propulsive n'est alors plus contrôlable
6	2	2	Contrôlerapide et efficace de la force propulsive	3	La rotation du profil permet de contrôler la force propulsive

FIGURE I.19 – Indicateurs de performance pour l'évaluation des voiles rigides.

SR		Indicateur de performance	Voiles rigides			
1	1	Moment de chavirement	1.9	2		
		Espace occupé sur le pont		1		
		Nombre de composants du système		1		
		Nombre de fournisseurs		2		
		Quantité et prix des matériaux		3		
	2	Besoin d'équipements et d'outillage spécialisés		3		
		Besoin de travailleurs spécialisés		1		
		Besoin d'infrastructures spécialisées		2		
	2	1		Besoin d'opérateurs	1.8	3
		2		Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants		2
				Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants		1
		3		Durée de vie ou TRL des sous-systèmes et composants		2
	Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants			1		
	3	3		Force propulsive générée	2.5	1
				Sensibilité de la force propulsive à l'angle du vent		3
				Rapport poids / force propulsive		3
				Consommation énergétique		3
				Force de dérive générée		2
				Contrôlabilité de la force propulsive		3
	4	1		Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants	1.5	2
Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants			1			
2		Durée de vie ou TRL des sous-systèmes et composants	2			
		Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	1			
2	1	Niveau de développement de la technologie	2.2	3		
		Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants		2		
		Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants		1		
		Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants		2		
		Sensibilité de la force propulsive à l'angle du vent		3		
	4	Nombre de fournisseurs		2		
2	1	Conséquence de la rupture d'un composant en condition extrême	1.0	1		
4	1	Création d'emploi (par exemple pour la maintenance)	2.0	2		
	4	Recyclabilité des composants et matériaux	2.5	2		
		Durée de vie du système et de ses composants		3		
5	1	Conflits d'usage	3.0	3		
	2	Risque de collision avec l'avifaune	3.0	3		
6	1	Possibilité de bloquer le système	2.0	2		
	2	Contrôlerapide et efficace de la force propulsive	3.0	3		
Moyenne générale			2.20	2.08		

FIGURE I.20 – Notes obtenues par les voiles rigides aux indicateurs de performance et aux exigences de niveau 2.

I.2.2.3 Ailes de kite

Présentation de la technologie Un système de propulsion par aile de kite est constitué d'une aile autoportante relié au navire par un ensemble de filins. Un mât peut être fixé sur le navire afin de manœuvrer les filins. Le nombre de filins, la forme et les matériaux de l'aile peuvent varier suivant les systèmes (voir les exemples figure I.21) (50). Les matériaux principaux utilisés sont des tissus renforcés en certains points par une armature. Le principal avantage de ces matériaux est leur légèreté surfacique pour constituer la surface portante.

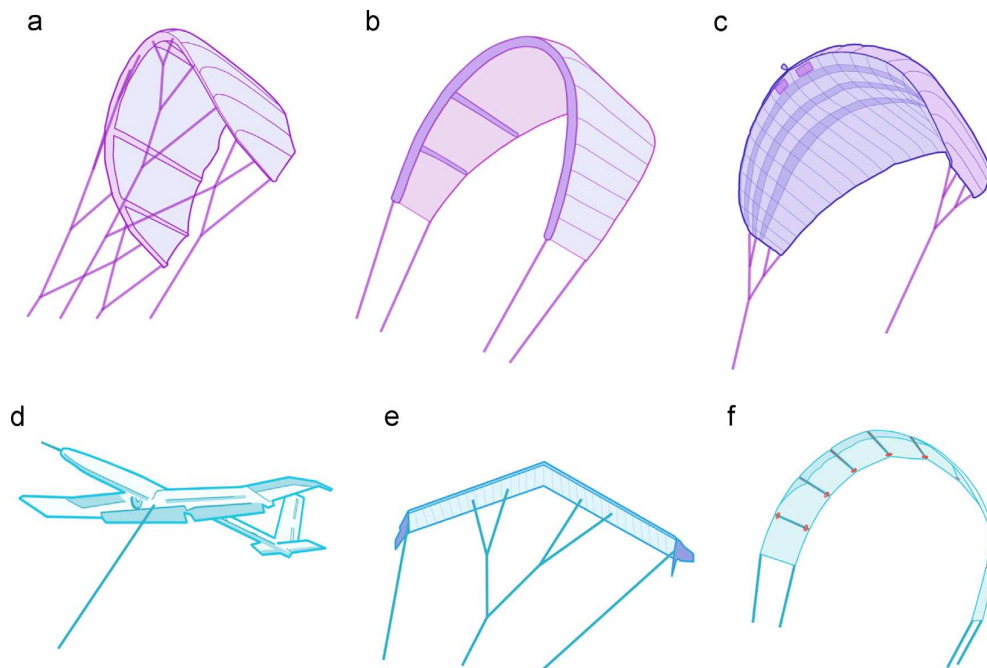


FIGURE I.21 – Différentes formes d'aile de kite (50) : (a) LEI SLE Kite (Leading Edge Inflatable, Supported Leading Edge) ; (b) LEIC-kite ; (c) Foil Kite, de Skysails ; (d) Glider (Ampyx Power) ; (e) Swept rigid wing (Enerkite) ; (f) Aile semi-rigide (Kitegen)

Lorsque le système n'est pas utilisé l'aile est ramenée à bord et pliée. Plusieurs propositions comportant parfois un mât spécifique ont été émises pour les rangement et le pliage automatique de l'aile. Il en est de même pour son lancement automatique. Le réglage de la force propulsive se fait en ajustant la position de l'aile par rapport au navire (force propulsive nulle lorsque l'aile est placée au dessus du navire, force propulsive élevée lorsqu'elle est placée vers l'avant). Le fonctionnement de l'aile est la plupart du temps dynamique, l'aile se déplaçant sur un circuit régulier (en suivant par exemple un trajet en forme de 8) (51).

Le navire Beluga skysails lancé en 2007 est un exemple d'application de cette technologie de propulsion (52; 53). Le système skysail a la particularité de disposer d'une nacelle de contrôle proche de l'aile (54). Cela permet de limiter le nombre de filin, la nacelle n'étant reliée au navire que par un seul filin (voir figure I.22a). Des expérimentations sur les ailes de kite ont également été menées par "beyond the sea" et l'ENSTA Bretagne afin de caractériser les performances des ailes de kite (voir photo I.22b) (55; 56; 57; 58).

Les ailes de kite sont également utilisées pour produire de l'énergie à partir des variations de tension des filins lors du déplacement de l'aile (59; 60; 61). Ce procédé est par exemple mis en avant dans une solution hybride (production d'énergie et traction du navire) dans le système "Kitenav" (62).

Enfin, certaines propositions de navire de production d'énergie mentionnent les ailes de kite comme système de propulsion (8).

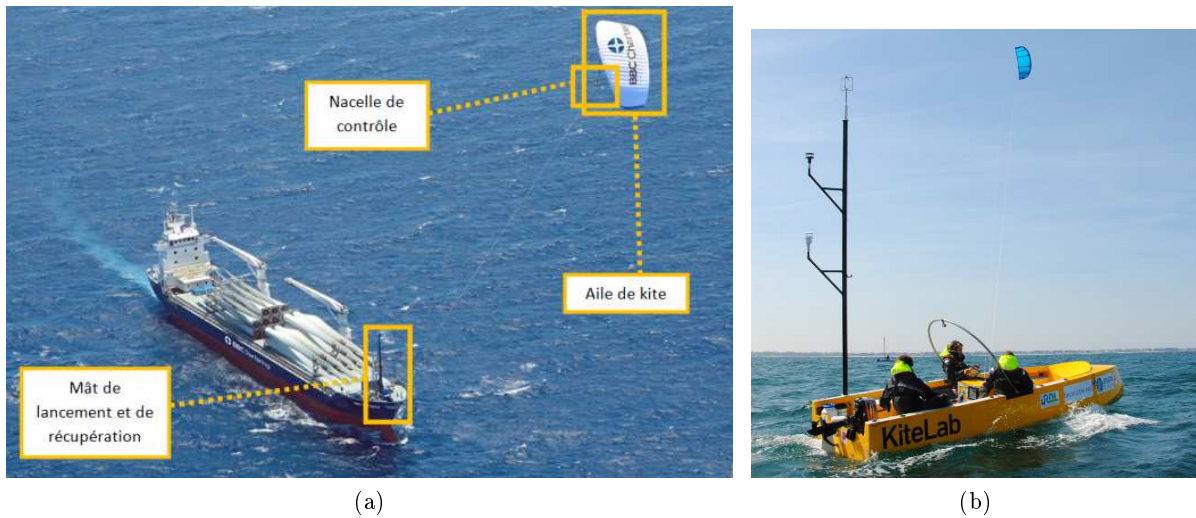


FIGURE I.22 – A gauche : le navire "Beluga Skysail avec son aile de kite équipée d'une nacelle de contrôle ; A droite : Essais en mer pour la caractérisation des ailes de kite (58).

Évaluation des indicateurs On réalise le calcul des indicateurs de performance pour les ailes de kite. Pour le calcul des ailes kite la particularité repose dans l'altitude de l'aile qui a un impact sur certaines valeurs. On choisit de représenter les coefficients de portance et de traînée en fonction de la vitesse du vent à l'altitude d'évolution de l'aile. Dans (63; 64) il est montré que dans un vent de vitesse 6,18 m/s (à 10 m) une aile de 300 m² peut produire une traction de 30 kN (cette vitesse de vent correspond à 16,5 m/s à l'altitude d'évolution de l'aile c'est-à-dire à 300 m). Les coefficients de portance (0,8) et de traînée (0,1) sont faibles mais le ratio portance/traînée est correct (ratio de 6). D'autres expérimentations en mer et à terre (56) montrent un rapport portance/traînée proche (de 4,5 à 6) avec un coefficient de portance similaire (coefficient de portance de 0,7 à 0,1). Ces résultats sont proches de (65) où l'on trouve un coefficient de portance de 0,5 pour les angles d'attaque faibles et avec un coefficient de traînée proche de 0 (inférieur à 0,1). On retrouve à nouveau un ordre de grandeur similaire dans (58) (coefficient de portance 0,7 et un rapport de portance/traînée entre 4,5 et 5). Les simulations numériques obtiennent également des résultats similaires (66). Avec ces données et pour obtenir la force propulsive souhaitée, il faut une aile de 943 m² à une altitude de 200 m ou une aile de 837 m² à une altitude de 300 m.

Paramètre	Valeur	Unité
Coefficient de portance retenu	0,7	
Coefficient de traînée retenu	0,1	
Surface de l'aile	943	m ²
Taille du profil	30,7*30,7	m ²
Consommation énergétique	0	% de la puissance de propulsion
Force de dérive	69%	% de la force propulsive
Moment de chavirement	négligeable	-
Force propulsive avec TWA = 60°	66%	% de la force propulsive
Force propulsive avec TWA = 120°	73%	% de la force propulsive

TABLE I.5 – Paramètres principaux des ailes de kite.

Finalement, on retiendra un coefficient de portance de 0,7 et un coefficient de traînée de 0,1. L'altitude de l'aile retenue est celle qui est utilisée pour les plus grands systèmes soit environ 200 m (53). En considérant le gradient de vent sélectionné (voir figure précédente I.10) et une vitesse de vent de 10 m/s, la vitesse du vent incident sur l'aile est de 15,2 m/s. La valeur des paramètres principaux des ailes de kite sont ensuite calculés et sont détaillés dans le tableau I.5. Comme le moment de chavirement est très faible avec ce système (le point d'application de la force aérodynamique est reportée grâce au flin au niveau du pont du navire), la valeur de dimensionnement retenue est la force aérodynamique maximum. On fixe cette valeur à la valeur de la force aérodynamique au vent de travers (cas AWA = 90°).

L'évaluation des indicateurs de performance est détaillée dans le tableau I.23. Le tableau I.24 présente la note obtenue pour chaque indicateur et pour chaque exigence de niveau 2. Les voiles souples obtiennent pour les indicateurs une note moyenne de 2,18. La moyenne pondérée est de 2,30.

Evaluation des ailes de kite					
SR	Indicateur de performance	Note	Description/justification		
1	1	Moment de chavirement	3	Fixation par pivot sur le pont, pas de moment de chavirement	
		Espace occupé sur le pont	3	Espace limité à la zone de lancement et de récupération de l'aile	
		Nombre de composants du système	3	Voile, filins, système de contrôle et d'enroulage des filins, mât de lancement et de récupération	
		Nombre de fournisseurs	2	Technologie émergente avec peu de fournisseurs	
		Quantité et prix des matériaux	3	Peu de matériaux requis, les matériaux spécialisés pour la toile de l'aile et les filins peuvent être chers	
	2	Besoin d'équipements et d'outillage spécialisés	2	Matériaux spécialisés pour le tissu de l'aile, autre composants classiques (assemble de pièces mécaniques)	
		Besoin de travailleurs spécialisés	2	Méthodes spécialisés pour le tissu de l'aile, autre composants classiques (assemble de pièces mécaniques)	
		Besoin d'infrastructures spécialisées	3	Pas de grande structure	
	2	1	Besoin d'opérateurs	2	Peut être entièrement automatisé, procédure incertaine en cas de panne d'un composant du système (rupture d'un filin, chute de l'aile)
			Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants	1	Incertitude sur les matériaux nécessaires pour les ailes de grande surface (943 m ² ou plus demandé)
		3	Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	3	Le système peut être rangé, chaque composant est remplaçable individuellement
			Durée de vie ou TRL des sous-systèmes et composants	1	La durée des matériaux de l'aile est incertaine
			Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	3	Le système peut être rangé, chaque composant est remplaçable individuellement
			Force propulsive générée	1	Coefficient de portance faible (0,7)
	3	Sensibilité de la force propulsive à l'angle du vent	3	Force propulsive de 66% à 60° et de 73% à 120°	
		Rapport poids / force propulsive	3	Système léger (tissu, filin, peu de pièces mécaniques)	
		Consommation énergétique	3	Pas de consommation d'énergie, il est possible de générer de l'énergie électrique en fonctionnement	
		Force de dérive générée	3	69% de dérive générée	
		Contrôlabilité de la force propulsive	3	La position de l'aile permet de contrôler la force propulsive	
	4	1	Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants	1	Les matériaux pour l'aile ne sont pas encore définis, il y a peu d'exemple d'application de systèmes de grande envergure
			Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	3	Le système peut être rangé, chaque composant est remplaçable individuellement
2		Durée de vie ou TRL des sous-systèmes et composants	2	La durée de vie du tissu de l'aile est incertaine	
		Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	3	Le système peut être rangé, chaque composant est remplaçable individuellement	
2	1	Niveau de développement de la technologie	3	TRL entre 8 et 9 (début de la commercialisation du système)	
		Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants	1	Les matériaux pour l'aile ne sont pas encore définis, il y a peu d'exemple d'application de systèmes de grande envergure	
		Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	3	Le système peut être rangé, chaque composant est remplaçable individuellement	
		Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants	1	Les matériaux pour l'aile ne sont pas encore définis, il y a peu d'exemple d'application de systèmes de grande envergure	
		Sensibilité de la force propulsive à l'angle du vent	3	Force propulsive de 66% à 60° et de 73% à 120°	
	4	Nombre de fournisseurs	2	Technologie émergente avec peu de fournisseurs	
	2	1	Conséquence de la rupture d'un composant en condition extrême	1	L'aile peut être maintenue en position haute pour limiter la tension sur les filins, risque pour le système et pour le navire en cas de chute de l'aile
4	1	Création d'emploi (par exemple pour la	2	La durée de vie du tissu de l'aile est incertaine	
		Recyclabilité des composants et matériaux	2	Matériaux non spécifiés pour l'aile, autre matériaux recyclables (métaux)	
	4	Durée de vie du système et de ses composants	1	La durée de vie du tissu de l'aile est incertaine	
5	1	Conflits d'usage	2	La position de l'aile loin du navire peut être gênante pour la circulation dans les zones de trafic élevé (chenaux)	
	2	Risque de collision avec l'avifaune	2	Pas de risque de collision spécifique mais sujet qui peut porter à débat	
6	1	Possibilité de bloquer le système	3	L'aile peut être maintenue en position haute (force propulsive nulle)	
	2	Contrôler rapide et efficace de la force propulsive	3	La position de l'aile permet de contrôler la force propulsive	

FIGURE I.23 – Indicateurs de performance pour l'évaluation des ailes de kite.

SR		Indicateur de performance	Ailes de kite			
1	1	Moment de chavirement	2.6	3		
		Espace occupé sur le pont		3		
		Nombre de composants du système		3		
		Nombre de fournisseurs		2		
		Quantité et prix des matériaux		3		
	2	Besoin d'équipements et d'outillage spécialisés		2		
		Besoin de travailleurs spécialisés		2		
		Besoin d'infrastructures spécialisées		3		
	2	1		Besoin d'opérateurs	2.0	2
		2		Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants		1
				Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants		3
		3		Durée de vie ou TRL des sous-systèmes et composants		1
	Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants			3		
	3			Force propulsive générée	2.7	1
				Sensibilité de la force propulsive à l'angle du vent		3
				Rapport poids / force propulsive		3
				Consommation énergétique		3
				Force de dérive générée		3
				Contrôlabilité de la force propulsive		3
	4	1		Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants	2.3	1
Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants			3			
2		Durée de vie ou TRL des sous-systèmes et composants	2			
		Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	3			
2	1	Niveau de développement de la technologie	2.2	3		
		Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants		1		
		Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants		3		
		Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants		1		
		Sensibilité de la force propulsive à l'angle du vent		3		
	4	Nombre de fournisseurs		2		
2	1	Conséquence de la rupture d'un composant en condition extrême	1.0	1		
4	1	Création d'emploi (par exemple pour la maintenance)	2.0	2		
	4	Recyclabilité des composants et matériaux	1.5	2		
		Durée de vie du système et de ses composants		1		
5	1	Conflits d'usage	2.0	2		
	2	Risque de collision avec l'avifaune	2.0	2		
6	1	Possibilité de bloquer le système	3.0	3		
	2	Contrôlerapide et efficace de la force propulsive	3.0	3		
Moyenne générale			2.18	2.30		

FIGURE I.24 – Notes obtenues par les ailes de kite aux indicateurs de performance et aux exigences de niveau 2.

I.2.2.4 Rotors Flettner

Présentation de la technologie Comme indiqué sur la figure I.25a, un rotor Flettner est un cylindre vertical en rotation (67; 68; 69). Grâce à l'effet Magnus, lorsque celui-ci est placé dans un courant incident, il génère une résultante aérodynamique orthogonale à l'écoulement (la portance) (70; 71).

L'ajustement de la vitesse de rotation du rotor permet de faire varier sa portance. La mise en rotation d'un rotor est consommatrice d'énergie. Le moteur permettant la rotation du rotor peut être placé dans sa partie basse, le reste du rotor restant creux (72; 73). Sur la partie supérieure du rotor il y a généralement un disque de diamètre supérieur au rotor. Celui-ci améliore grandement ses performances aérodynamiques (74; 75; 76). Il existe également des exemples de rotors présentant plusieurs disques répartis sur la hauteur du cylindre (77). La géométrie avec un seul disque en haut de rotor est toutefois privilégié dans la plupart des applications récentes.

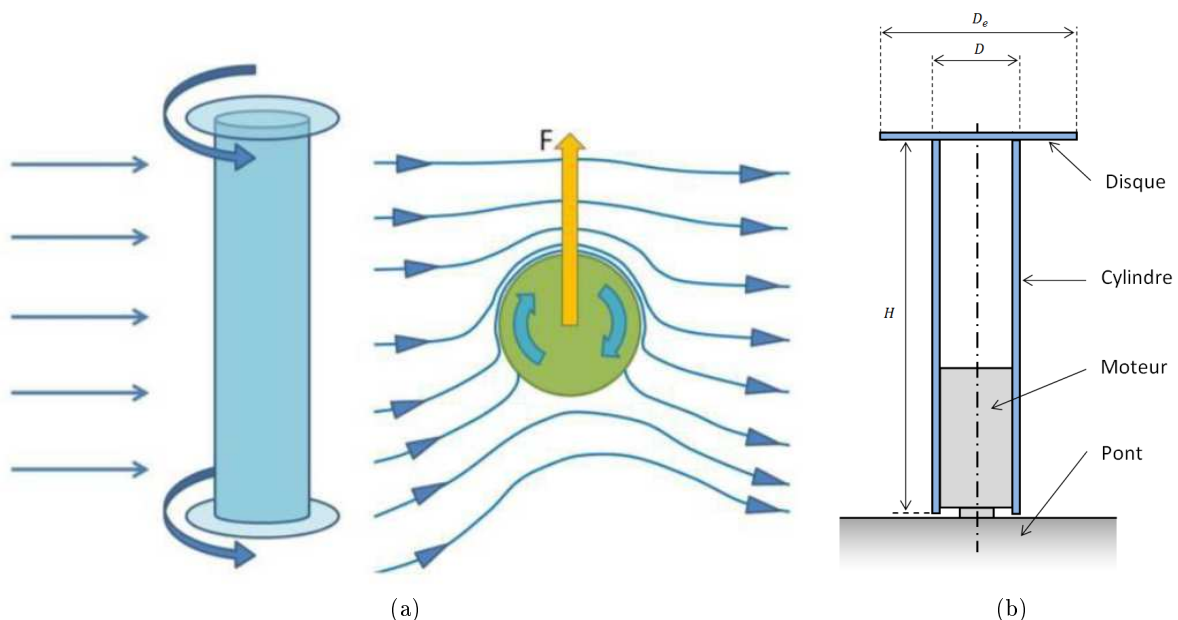


FIGURE I.25 – A gauche : principe de fonctionnement d'un rotor Flettner (71) ; A droite : schéma en coupe d'un rotor Flettner.

Le Buckau lancé en 1925 (voir photo I.26a) et le Barbara (lancé en 1926) furent les premiers navires équipés de rotors Flettner (78). Les développements suivants ont eu lieu à partir des années 1980 (70; 74; 79).

Plusieurs navires équipés de rotors Flettner sont aujourd'hui utilisés. C'est le cas par exemple du "E-ship1" de Enercon (voir photo I.26b) (72). La taille maximale des rotors Flettner actuels est de 31 m de haut pour 5 m de diamètre (exemple du grand rotor de la société Eco Flettner). Le navire "Maersk Pelican" est par exemple équipé de 2 rotors de hauteur 30 m. Le nombre de rotors sur un navire varie de 1 à 4 mais il faut considérer que la plupart des systèmes ne sont qu'une assistance à la propulsion qui doit être couplé avec une propulsion classique (permet une diminution de 15 à 30% de la consommation de carburant des navires équipés (80; 81)).



FIGURE I.26 – A gauche : le premier navire équipé de rotor Flettner, le "Buckau" ; A droite : le navire E-Ship 1 de la société Enercon (crédit photo : Michel Floch, septembre 2011).

Évaluation des indicateurs On réalise le calcul des indicateurs de performance pour les rotors Flettner. De nombreuses études ont été réalisées à la fois sur les cylindres tournant et sur les rotors Flettner permettant ainsi de disposer de valeurs fiables pour les coefficients de portance et de traînée (70; 71; 75; 76; 82; 83; 84).

Dans les exemples décrits dans le paragraphe précédent la géométrie des rotors est proche de cette étude expérimentale (75) (c'est-à-dire un rapport entre la hauteur et le diamètre proche et un diamètre de disque valant deux fois le diamètre du cylindre). On retiendra donc un coefficient de portance de 9 et un coefficient de traînée de 2. Ces valeurs sont prises pour la vitesse de rotation optimale du rotor (c'est-à-dire celle qui permet le meilleur rapport traînée/portance).

Paramètre	Valeur	Unité
Coefficient de portance retenu	9,0	
Coefficient de traînée retenu	2,0	
Hauteur du rotor	30,2	m
Diamètre du rotor	5,0	m
Consommation énergétique	max 90	kW (électrique)
Force de dérive	111%	% de la force propulsive
Moment de chavirement	2115	kNm
Force propulsive avec TWA = 60°	36%	% de la force propulsive
Force propulsive avec TWA = 120°	71%	% de la force propulsive

TABLE I.6 – Paramètres principaux des rotors Flettner.

Contrairement aux voiles souples ou rigides où l'adaptation de la force propulsive est adaptée en ajustant la surface portante, pour un rotor Flettner on doit ajuster la vitesse de rotation. Pour le calcul de la force propulsive avec TWA = 60° en respectant le couple de chavirement nominal, on sélectionne les coefficients aérodynamiques correspondant à cette contrainte. La valeur correspondant est : coefficient de portance de 4,7 et coefficient de traînée de 1,5. Peu de données sont disponibles sur la consommation électrique des rotors. Certaines puissances de moteur sont néanmoins disponibles dans les documentations constructeurs et correspondent à la consommation maximum d'un rotor. Les valeurs calculées pour les paramètres principaux sont indiquées dans le tableau I.6.

L'évaluation des indicateurs de performance est détaillée dans le tableau I.27. Le tableau I.28 présente la note obtenue pour chaque indicateur et pour chaque exigence de niveau 2. Les voiles souples obtiennent pour les indicateurs une note moyenne de 2,54. La moyenne pondérée est de 2,38.

Evaluation des rotors Flettner					
SR	Indicateur de performance	Note	Description/justification		
1	1	Moment de chavirement	2	Moment de chavirement moyen (2115 kNm)	
		Espace occupé sur le pont	3	Peu d'espace occupé (diamètre 5 m)	
		Nombre de composants du système	3	Moteur, fixations et roulements, cylindre principal	
		Nombre de fournisseurs	2	Technologie émergente avec peu de fournisseurs	
		Quantité et prix des matériaux	3	Structure légère en composite ou aluminium, moteur de 80kW avec roulement grand diamètre	
	2	Besoin d'équipements et d'outillage spécialisés	2	Pièces moteurs connues, besoin d'outillage pour l'assemblage final et les liaisons moteur/roulements/cylindre	
		Besoin de travailleurs spécialisés	1	Fabrication du moteur, roulements spéciaux	
		Besoin d'infrastructures spécialisées	2	Structure de 30 m de haut	
	2	1	Besoin d'opérateurs	3	Entièrement automatisé
			Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et	3	Composants connus et fiables
		2	Accessibilité pour la réparation et le	3	L'intérieur du cylindre peut être accessible, le cylindre peut être bloqué
			Durée de vie ou TRL des sous-systèmes et composants	2	Composants connus et fiables, incertitude sur la durée de vie des roulements grand diamètre en conditions marines
			Accessibilité pour la réparation et le	3	L'intérieur du cylindre peut être accessible, le cylindre peut être bloqué
			Force propulsive générée	3	Coefficient de portance élevé (9)
	3	Sensibilité de la force propulsive à l'angle du vent	1	Force propulsive de 36% à 60° et de 71% à 120°	
		Rapport poids / force propulsive	1	Structure légère mais moteur lourd (rotor de 49 tonnes)	
		Consommation énergétique	1	L'énergie consommée correspond à 8 à 13% de l'énergie produite pour la propulsion (puissance max du rotor 90kW)	
		Force de dérive générée	1	111% de force de dérive générée	
		Contrôlabilité de la force propulsive	3	La vitesse de rotation du rotor a un impact direct sur la force propulsive, temps de	
	4	1	Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et	3	Composants connus et fiables
			Accessibilité pour la réparation et le	3	L'intérieur du cylindre peut être accessible, le cylindre peut être bloqué
2		Durée de vie ou TRL des sous-systèmes et composants	2	Composants connus et fiables, incertitude sur la durée de vie des roulements grand diamètre en conditions marines	
2	1	Accessibilité pour la réparation et le	3	L'intérieur du cylindre peut être accessible, le cylindre peut être bloqué	
		Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et	3	Composants connus et fiables	
		Sensibilité de la force propulsive à l'angle du vent	1	Force propulsive de 36% à 60° et de 71% à 120°	
	2	4	Nombre de fournisseurs	2	Technologie émergente avec peu de fournisseurs
		1	Conséquence de la rupture d'un composant en condition extrême	3	L'arrêt du rotor provoque une chute de la force propulsive, la contrainte en condition extrême (vitesse du vent de 60 nd) sur la fixation du rotor est inférieure à la contrainte en conditions nominales
		4	Création d'emploi (par exemple pour la	2	Maintenance du moteur, des roulements et des équipements électriques
4	4	Recyclabilité des composants et matériaux	1	Matériaux composite et moteur peu recyclables	
		Durée de vie du système et de ses composants	2	Composants connus et fiables, incertitude sur la durée de vie des roulements grand diamètre en conditions marines	
5	1	Conflits d'usage	3	Pas de conflit relatif à ce système	
	2	Risque de collision avec l'avifaune	3	Pas de risque de collision avec ce système	
6	1	Possibilité de bloquer le système	3	Le blocage de l'arotation du rotor est possible	
	2	Contrôlerapide et efficace de la force	3	La variation de la vitesse de rotation ou le blocage du rotor permet un contrôle rapide	

FIGURE I.27 – Indicateurs de performance pour l'évaluation des rotors Flettner.

SR		Indicateur de performance	Rotors Flettner			
1	1	Moment de chavirement	2.3	2		
		Espace occupé sur le pont		3		
		Nombre de composants du système		3		
		Nombre de fournisseurs		2		
		Quantité et prix des matériaux		3		
	2	Besoin d'équipements et d'outillage spécialisés		2		
		Besoin de travailleurs spécialisés		1		
		Besoin d'infrastructures spécialisées		2		
	2	1		Besoin d'opérateurs	2.8	3
				Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants		3
		2		Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants		3
				Durée de vie ou TRL des sous-systèmes et composants		2
	3	Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants		3		
		Force propulsive générée		1.7	3	
	Sensibilité de la force propulsive à l'angle du vent	1				
	Rapport poids / force propulsive	1				
	Consommation énergétique	1				
	Force de dérive générée	1				
	Contrôlabilité de la force propulsive	3				
	4	1		Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants	2.8	3
Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants			3			
2		Durée de vie ou TRL des sous-systèmes et composants	2			
		Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	3			
2	1	Niveau de développement de la technologie	2.5	3		
		Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants		3		
		Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants		3		
		Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants		3		
		Sensibilité de la force propulsive à l'angle du vent		1		
	4	Nombre de fournisseurs		2		
2	1	Conséquence de la rupture d'un composant en condition extrême	3.0	3		
4	1	Création d'emploi (par exemple pour la maintenance)	2.0	2		
	4	Recyclabilité des composants et matériaux	1.5	1		
Durée de vie du système et de ses composants		2				
5	1	Conflits d'usage	3.0	3		
	2	Risque de collision avec l'avifaune	3.0	3		
6	1	Possibilité de bloquer le système	3.0	3		
	2	Contrôlerapide et efficace de la force propulsive	3.0	3		
Moyenne générale			2.54	2.38		

FIGURE I.28 – Notes obtenues par les rotors Flettner aux indicateurs de performance et aux exigences de niveau 2.

I.2.2.5 Turbovoiles

Présentation de la technologie Une turbovoile est constituée d'un profil épais (épaisseur de 50 à 70% de la longueur du profil) comme indiqué sur la figure I.29a. Une turbine permet l'aspiration de l'air dans certaines zones du profil ("suction area" sur le schéma). Ce mécanisme d'aspiration consomme de l'énergie. Un volet orientable ("flap" sur le schéma) placé à l'arrière du profil vient compléter le dispositif (85). Le profil peut être orienté en fonction de la direction du vent. Ce système peut être retrouvé en anglais sous le nom de "turbosail".

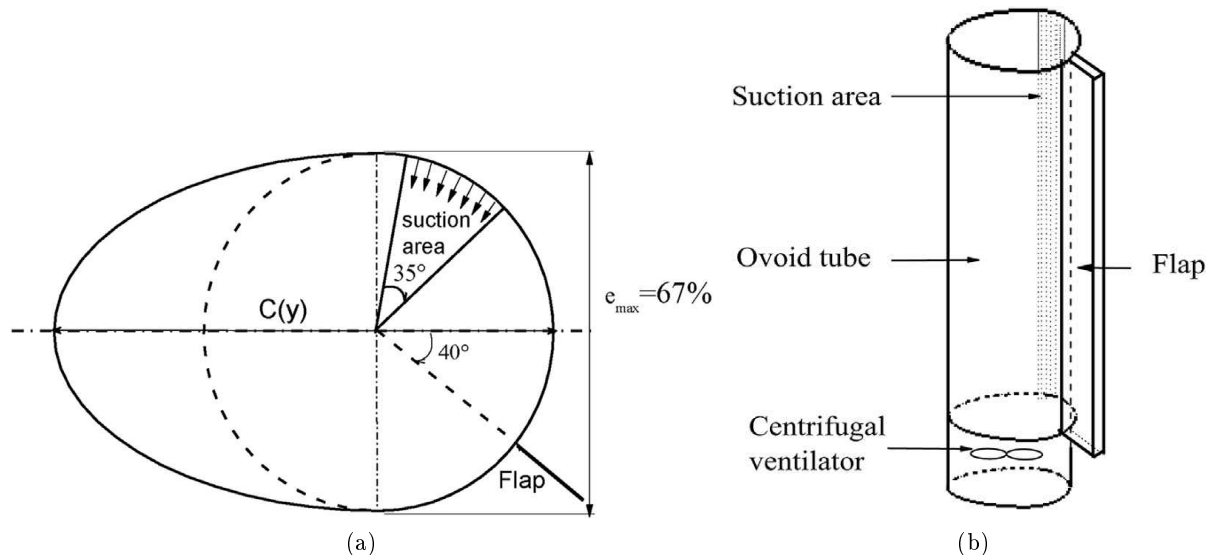


FIGURE I.29 – Schéma de principe d'une turbovoile (86). A gauche : schéma du profil ; A droite : schéma des composants principaux.

Les turbovoiles ont été créées en 1982 par la fondation Cousteau (87). Ce brevet européen (valable jusqu'en 2001) a pu limiter le développement de ce système au moment où les rotors Flettner par exemple faisaient l'objet de nombreuses recherches. Il existe ainsi peu d'exemples d'application de ce système.

L'application la plus marquante est l'Alcyone équipé de deux turbovoiles (voir photo I.30a). Des mesures en mer et la validation du concept ont été réalisées sur ce navire (88).

On peut également citer des développements plus récents comme par exemple les "ventifoil" de Econowind (89). Le navire "Ankie" est un exemple d'application du ventifoil (voir photo I.30b). On remarque la différence d'envergure des turbovoiles de l'Alcyone (qui constituent sa propulsion principale) et de l'Ankie dont les ventifoil placés à l'avant ne sont qu'une propulsion auxiliaire.

Évaluation des indicateurs On réalise le calcul des indicateurs de performance pour les turbovoiles (voir tableau I.7). Les études expérimentales (90) montrent que l'on peut atteindre un coefficient de portance élevé de 4,5 et un coefficient de traînée de 0,7. Cela correspond à un rapport de portance/traînée de 6,4. Des études numériques et les relevés mesurés par la fondation Cousteau obtiennent des valeurs similaires (86; 91; 92).



FIGURE I.30 – A gauche : "l'Alcyone" (1985) de la Fondation Cousteau (85) ; A droite : le "Ankie" équipé en 2019 de deux "ventifoil" de Econowind (89).

La valeur de 4,5 pour le coefficient de portance et de 0,7 pour le coefficient de traînée est donc retenue pour les calculs. La variation de l'incidence du profil ou la diminution de l'aspiration permettent de réduire la portance d'une turbovoile. En considérant le moment de chavirement nominal comme contrainte on retient alors la valeur du coefficient de portance de 2,3 et du coefficient de traînée de 0,6 (90) pour le calcul de la force propulsive à $TWA = 60^\circ$. Selon (87) la consommation énergétique de la turbine est de 7,5% de la puissance de propulsion produite pour un navire se déplaçant à une vitesse de 7,5 m/s. Les paramètres principaux des turbovoiles sont détaillées dans le tableau I.7.

L'évaluation des indicateurs de performance est détaillée dans le tableau I.31. Le tableau I.32 présente la note obtenue pour chaque indicateur et pour chaque exigence de niveau 2. Les voiles souples obtiennent pour les indicateurs une note moyenne de 2,51. La moyenne pondérée est de 2,32.

Paramètre	Valeur	Unité
Coefficient de portance retenu	4,5	
Coefficient de traînée retenu	0,7	
Hauteur du système	37,0	m
Dimension du profil	6,0*4,0	m ²
Consommation énergétique	7,5%	% de la puissance de propulsion
Force de dérive	94%	% de la force propulsive
Moment de chavirement	2150	kNm
Force propulsive avec $TWA = 60^\circ$	38%	% de la force propulsive
Force propulsive avec $TWA = 120^\circ$	68%	% de la force propulsive

TABLE I.7 – Paramètres principaux des turbo-voiles.

Evaluation des trubovoiles						
SR	Indicateur de performance	Note	Description/justification			
1	Moment de chavirement	2	Moment de chavirement moyen (2150 kNm)			
	Espace occupé sur le pont	3	Un cercle de 6 m de diamètre est nécessaire à la rotation du profil, il n'y a pas d'éléments mobiles autour			
	1	Nombre de composants du système	2	Structure principalement creuse avec quelques pièces mobiles (les volets) et une turbine		
		Nombre de fournisseurs	2	Technologie émergente avec peu de fournisseurs		
	2	Quantité et prix des matériaux	3	Structure légère en matériaux composites		
		Besoin d'équipements et d'outillage spécialisés	2	Peu d'équipements spécialisés demandés (pièces mécaniques légères, montage de la turbine)		
		Besoin de travailleurs spécialisés	1	Montage mécanique usuel, besoin de main d'œuvre spécialisée pour l'assemblage final		
	2	Besoin d'infrastructures spécialisées	2	Structure de 37 m de haut		
		1	Besoin d'opérateurs	3	Entièrement automatisé	
		2	Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants	3	Composants connus et fiables	
			Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	3	L'intérieur du système est accessible, il est possible de démonter certains composants individuellement	
			Durée de vie ou TRL des sous-systèmes et composants	3	Composants connus et fiables	
		3	Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	3	L'intérieur du système est accessible, il est possible de démonter certains composants individuellement	
			Force propulsive générée	3	Coefficient de portance élevé (Cl = 5,4)	
			Sensibilité de la force propulsive à l'angle du vent	1	Force propulsive de 38% à 60° et de 68% à 120°	
			Rapport poids / force propulsive	2	Structure légère excepté pour la turbine qui est d'un poids moyen	
			Consommation énergétique	1	La puissance consommée correspond à 8% de la puissance de propulsion	
	4	Force de dérive générée	1	94% de force de dérive générée		
		Contrôlabilité de la force propulsive	3	Le contrôle de l'aspiration par la turbine permet d'adapter la force propulsive générée, temps de réponse rapide		
		1	Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants	3	Composants connus et fiables	
			Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	2	L'intérieur du système est accessible, il est possible de démonter certains composants individuellement	
		2	Durée de vie ou TRL des sous-systèmes et composants	3	Composants connus et fiables	
			Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	2	L'intérieur du système est accessible, il est possible de démonter certains composants individuellement	
		2	Niveau de développement de la technologie	2	TRL de 9 mais peu d'application récente	
			1	Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants	3	Composants connus et fiables
				Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	2	L'intérieur du système est accessible, il est possible de démonter certains composants individuellement
				Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants	3	Composants connus et fiables
4	Sensibilité de la force propulsive à l'angle du vent		1	Force propulsive de 38% à 60° et de 68% à 120°		
	Nombre de fournisseurs		2	Technologie émergente avec peu de fournisseurs		
4	2		1	Conséquence de la rupture d'un composant en condition extrême	3	L'arrêt de l'aspiration provoque une chute de la force propulsive, la contrainte en condition extrême (vitesse du vent de 60 nd) sur la fixation du rotor est inférieure à la contrainte en conditions nominales
	1	Création d'emploi (par exemple pour la	2	Maintenance des composants du système		
	4	Recyclabilité des composants et matériaux	1	Difficulté de recyclage des matériaux composites		
5	Durée de vie du système et de ses composants	2	Composants connus et fiables			
	1	Conflits d'usage	3	Pas de conflit relatif à ce système		
6	2	Risque de collision avec l'avifaune	3	Pas de risque de collision avec ce système		
	1	Possibilité de bloquer le système	3	L'arrêt de la ventilation et le blocage en rotation du profil est possible		
6	2	Contrôle rapide et efficace de la force propulsive	3	La variation du taux d'aspiration ou le blocage de la turbine permet un contrôle rapide		

FIGURE I.31 – Indicateurs de performance pour l'évaluation des turbovoiles.

SR		Indicateur de performance	Turbo-voiles			
1	1	Moment de chavirement	2.1	2		
		Espace occupé sur le pont		3		
		Nombre de composants du système		2		
		Nombre de fournisseurs		2		
		Quantité et prix des matériaux		3		
	2	Besoin d'équipements et d'outillage spécialisés		2		
		Besoin de travailleurs spécialisés		1		
		Besoin d'infrastructures spécialisées		2		
	2	1		3.0	Besoin d'opérateurs	3
		2			Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants	3
					Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	3
		3			Durée de vie ou TRL des sous-systèmes et composants	3
	Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants			3		
	3			Force propulsive générée	1.8	3
				Sensibilité de la force propulsive à l'angle du vent		1
				Rapport poids / force propulsive		2
				Consommation énergétique		1
				Force de dérive générée		1
	4			Contrôlabilité de la force propulsive	2.5	3
				1		Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants
2			Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	2		
2			Durée de vie ou TRL des sous-systèmes et composants	3		
2	1	Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	2.2	2		
		Niveau de développement de la technologie		2		
		1		Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants	3	
		2		Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	2	
		2		Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants	3	
		4		Sensibilité de la force propulsive à l'angle du vent	1	
4	1	4	3.0	Nombre de fournisseurs	2	
		1		Conséquence de la rupture d'un composant en condition extrême	3	
4	1	Création d'emploi (par exemple pour la maintenance)	2.0	2		
		4		Recyclabilité des composants et matériaux	1	
5	1	Durée de vie du système et de ses composants	1.5	2		
		2		Conflits d'usage	3	
6	1	Risque de collision avec l'avifaune	3.0	3		
		2		Possibilité de bloquer le système	3	
6	1	Contrôlerapide et efficace de la force propulsive	3.0	3		
		2			3	
Moyenne générale			2.51	2.32		

FIGURE I.32 – Notes obtenues par les turbovoiles aux indicateurs de performance et aux exigences de niveau 2.

I.2.3 Conclusion de l'étude de cas

Le tableau 1.33 regroupe l'ensemble des évaluations des indicateurs de performance pour les cinq technologies. La note générale obtenue est indiquée en bas de tableau (moyenne aux indicateurs de performances et moyenne pondérée).

Similitudes entre les systèmes Parmi les cinq technologies étudiés, des regroupements peuvent être faits. On remarque en effet que les rotors Flettner et les turbovoiles obtiennent des résultats très proches dans de nombreuses catégories. Leur conception et leur fonctionnement est en effet très similaire (profil épais ou cylindre, consommation d'énergie pour créer la force propulsive, possibilité de blocage, etc.). Par rapport aux rotors Flettner, les turbovoiles tendent cependant à être plus proches des voiles souples et rigides (consommation d'énergie plus faible, meilleur rapport portance/trainée, profil orientable).

On peut également regrouper les voiles souples et rigides du fait de leur similarité de fonctionnement. La note plus basse obtenue par les voiles rigides s'explique par les incertitudes sur l'accès aux composants et les modes de maintenance. Plus de données sur ce point pourraient lever ces incertitudes. On peut également noter qu'il y a une grande variété de systèmes de voiles rigides et de voiles souples. On trouve également des systèmes hybrides combinant ces deux technologies. Les différences de notes observées ici ne tiennent pas compte des spécificités de chaque exemple de système.

Choix du système de propulsion Les rotors Flettner obtiennent la meilleure note pour les deux moyennes calculées (2,54/3 et 2,38/3). Les turbovoiles obtiennent une note très proche (2,51/3 et 2,32/3). Parmi ces deux technologies, les rotors Flettner sont plus matures avec plusieurs rotors de grande taille (30 m par 5 m) en utilisation.

On peut remarquer la faible note obtenue à l'exigence 1.3 (1,7/3). Cette catégorie regroupe principalement des éléments de performance aérodynamique comme la force propulsive au près (navire contre le vent avec $TWA = 60^\circ$) et la consommation énergétique. Cependant, la moins bonne performance du navire à certain angles de vent est une contrainte de routage mais n'induit pas nécessairement une dégradation de la production énergétique (un routage de bonne qualité permettra au navire de naviguer la plupart du temps à son allure optimale). Cet élément sera discuté avec l'appui de la modélisation (II).

Les rotors Flettner obtiennent de bons résultats pour la plupart des autres indicateurs. Dans l'ensemble, l'évaluation montre que les rotors Flettner sont une technologie de propulsion fiable et avec des coûts d'investissement et de maintenance faibles et/ou maîtrisés. On retient ainsi cette technologie pour le voilier hydro-éolien.

SR	Indicateur de performance	Voiles souples	Voiles rigides	Ailes de kite	Rotors Flettner	Turbo-voiles	
1	Moment de chavirement	1	2	3	2	2	
	Espace occupé sur le pont	1	1	3	3	3	
	Nombre de composants du système	2	1	3	3	2	
	Nombre de fournisseurs	2	2	2	2	2	
	Quantité et prix des matériaux	3	3	3	3	3	
	Besoin d'équipements et d'outillage spécialisés	3	3	2	2	2	
	Besoin de travailleurs spécialisés	3	1	2	1	1	
	Besoin d'infrastructures spécialisées	2	2	3	2	2	
	Besoin d'opérateurs	3	3	2	3	3	
	Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants	3	2	1	3	3	
2	Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	3	1	3	3	3	
	Durée de vie ou TRL des sous-systèmes et composants	2	2	1	2	2	
	Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	3	1	3	3	3	
3	Force propulsive générée	1	1	1	3	3	
	Sensibilité de la force propulsive à l'angle du vent	2	3	3	1	1	
	Rapport poids / force propulsive	3	3	3	1	2	
	Consommation énergétique	3	3	3	1	1	
	Force de dérive générée	1	2	3	1	1	
	Contrôlabilité de la force propulsive	3	3	3	3	3	
	Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants	3	2	1	3	3	
	Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	2	1	3	3	2	
	Durée de vie ou TRL des sous-systèmes et composants	2	2	2	2	2	
	Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	3	1	3	3	3	
4	Niveau de développement de la technologie	3	3	3	3	2	
	Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants	3	2	1	3	3	
	Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	2	1	3	3	2	
	Durée de vie ou TRL des sous-systèmes et composants	2	2	2	2	2	
	Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	3	1	3	3	2	
	Niveau de développement de la technologie	3	3	3	3	2	
	Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants	3	2	1	3	3	
	Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	2	1	3	3	2	
	Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants	3	2	1	3	2	
	Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	3	1	3	3	2	
2	Sensibilité de la force propulsive à l'angle du vent	2	2	3	1	1	
	Rapport poids / force propulsive	3	3	3	1	2	
	Consommation énergétique	3	3	3	1	1	
	Force de dérive générée	1	2	3	1	1	
	Contrôlabilité de la force propulsive	3	3	3	3	3	
	Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants	3	2	1	3	3	
	Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	2	1	3	3	2	
	Durée de vie ou TRL des sous-systèmes et composants	2	2	2	2	2	
	Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	3	1	3	3	2	
	Niveau de développement de la technologie	3	3	3	3	2	
1	Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants	3	3	3	3	2	
	Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	2	1	3	3	2	
	Fiabilité ou TRL des sous-systèmes et composants	3	2	1	3	2	
	Accessibilité pour la réparation et le remplacement des composants	3	1	3	3	2	
	Sensibilité de la force propulsive à l'angle du vent	2	3	3	1	1	
	Nombre de fournisseurs	2	2	2	2	2	
	Conséquence de la rupture d'un composant en condition extrême	1	1	1	3	3	
	Création d'emploi (par exemple pour la maintenance)	2	2	2	2	2	
	Recyclabilité des composants et matériaux	3	2	2	1	1	
	Durée de vie du système et de ses composants	2	3	1	2	2	
5	Conflicts d'usage	3	3	2	3	3	
	Risque de collision avec l'avifaune	3	3	2	3	3	
	Possibilité de bloquer le système	3	3	2	3	3	
	Contrôler rapide et efficace de la force propulsive	2	2	3	3	3	
	Contrôler rapide et efficace de la force propulsive	3	3	3	3	3	
	Moyenne générale	2.38	2.20	2.08	2.18	2.54	2.51
		2.38	2.20	2.08	2.18	2.54	2.51

FIGURE I.33 – Notes obtenues par les cinq technologies de propulsion aux indicateurs de performance et aux exigences de niveau 2.

I.3 Conclusion du chapitre

Méthode développée Dans ce chapitre a été développé une méthode et un outil pour le choix de composants technologiques. Il y a deux difficultés principales à l'élaboration de la méthode. Premièrement chaque étape se doit d'être exhaustive. Il est intéressant, pour un résultat de meilleure qualité, de réaliser chaque étape en collaboration avec plusieurs personnes. Des relectures successives permettent de compléter les éléments manquants et de trouver les formulations adaptées (pour la description des étapes du cycle de vie par exemple). Deuxièmement, bien que les personnes réalisant ces études soient généralement impliqués dans le projet, il est important de garder un point de vue neutre. Cela signifie concrètement qu'il faut garder à l'esprit le besoin exprimé du projet (et par la suite ses exigences) et ne pas se focaliser sur les solutions techniques. Une définition précoce de la forme physique de la solution par exemple, ne permet pas de considérer toutes les solutions disponibles. Ces deux difficultés sont couramment rencontrés dans ce domaine d'étude (20).

Étude cas réalisée Une étude de cas a été réalisée sur le choix du système de propulsion éolien du voilier hydro-éolien. Afin de disposer de valeurs plus précises pour comparer les technologies une liste d'indicateurs de performances correspondant aux exigences du projet a été définie. Les voiles rigides et les voiles souples, dont de nombreux types de systèmes sont disponibles, ont un fonctionnement similaire. Les rotors Flettner et les turbovoiles ont également beaucoup de similitudes entre eux.

Réaliser l'évaluation de ces technologies a demandé une étude bibliographique des nombreux systèmes disponibles. La qualité et la quantité de données disponibles est variable suivant les systèmes (de l'étude scientifique à la brochure commerciale). De plus comme plusieurs systèmes différents peuvent être rassemblés dans une seule catégorie, il peut être délicat de donner un résultat moyen pour un ensemble de systèmes. Les outils développés (jusqu'aux indicateurs de performances) sont une aide efficace pour comparer les systèmes entre eux. Ils incitent à toujours se ramener à des valeurs comparables entre elles (par exemple quelle est la valeur de la force de dérive pour un système produisant une force propulsive de 100kN avec un vent de travers de vitesse 20 m/s).

Chapitre II

Modèle du navire

Dans ce chapitre on réalise une modélisation numérique d'un voilier hydro-éolien dans le but d'estimer ses caractéristiques telles que la puissance produite par les hydrogénérateurs et la vitesse du navire. Les étapes de transformation chimique de l'énergie (électrolyse pour la production d'hydrogène) ne rentrent pas dans le cadre de l'étude. En effet le choix d'un vecteur énergétique final dépend non seulement de sa valeur énergétique mais aussi de considérations économiques comme sa valeur marchande et les caractéristiques du marché (16) (18) (17). Pour les besoins de la modélisation (comme l'estimation du poids des équipements du navire), on suppose que l'énergie est convertie en hydrogène et stockée dans des cuves haute pression (11).

Le chapitre est composé de trois sections. La première section concerne les méthodes utilisées pour la modélisation II.1. La deuxième section concerne l'implémentation du calcul et ses différentes étapes ainsi que sa vérification II.2. Enfin, la troisième section détaille une étude de cas réalisée grâce au modèle mis en place II.3.

II.1 Méthodes

Dans cette section sont détaillées les méthodes utilisées pour modéliser le navire. Il y a quatre domaines de modélisation qui font chacun l'objet d'une sous-section : l'équation du mouvement, la partie aérodynamique du navire (vent incident et rotors Flettner), la partie hydrodynamique (résistance à l'avancement de la coque et des hydrogénérateurs) et la partie puissance et production électrique.

II.1.1 Équation du mouvement

Afin de connaître la production d'énergie moyenne d'un navire de production, on l'étudie en régime stationnaire avec des conditions environnementales constantes (c'est-à-dire vent constant et mer plate). Pour cela, on résout le mouvement du navire en régime stationnaire (II.1).

$$\sum \vec{F} = \vec{0} \tag{II.1}$$

On effectue l'inventaire des forces qui s'exercent sur le navire. Les forces dues à l'eau comprennent la poussée d'Archimède de chaque coque $B_{tri}^{\vec{}}$ et $B_{bab}^{\vec{}}$ et les résistances à l'avancement des hydrogénérateurs $R_H^{\vec{}}$ et de la carène $R_W^{\vec{}}$. A cela on ajoute la résultante aérodynamique $F_{aero}^{\vec{}}$ et le poids du navire \vec{P} . Finalement, l'équation du mouvement s'écrit (II.2). La vitesse d'avance, qui joue un rôle important dans le calcul de la puissance produite est calculée. L'angle de gîte et l'enfoncement dans l'eau qui ont une influence importante sur la vitesse du navire, sont aussi calculés. Les autres degrés de liberté ne sont pas considérés (assiette, dérive). Le navire étudié a ainsi trois degrés de liberté (vitesse d'avance, angle de gîte et enfoncement).

$$B_{tri}^{\vec{}} + B_{bab}^{\vec{}} + R_H^{\vec{}} + R_W^{\vec{}} + F_{aero}^{\vec{}} + \vec{P} = \vec{0} \quad (\text{II.2})$$

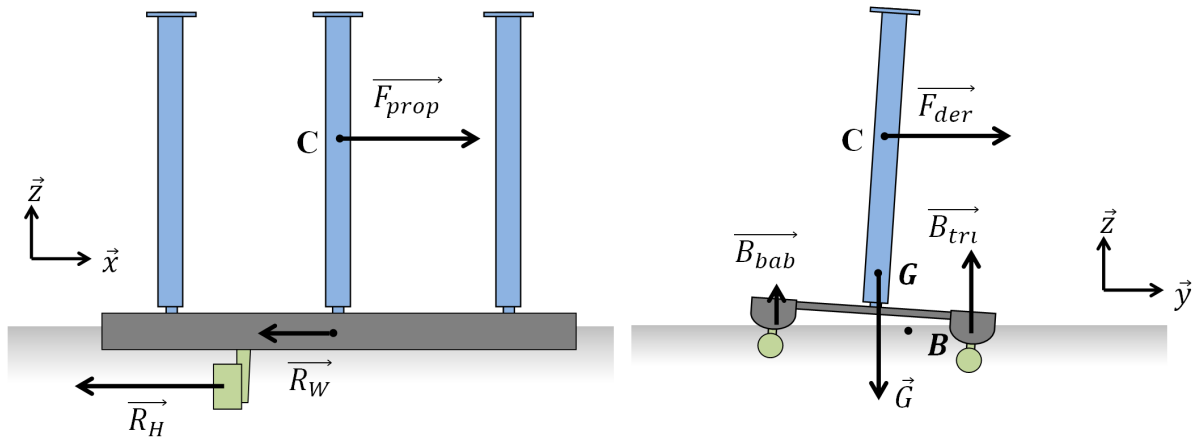


FIGURE II.1 – Schéma des forces s'exerçant sur le navire à gauche suivant le plan (x,z) et à droite suivant le plan (y,z).

Les forces qui s'exercent sur le navire et leur point d'application sont schématisées sur la figure II.1. La poussée d'Archimède s'applique au centre de carène B (c'est-à-dire centre des volumes immergés). Ce point varie en fonction des volumes immergés respectifs de la coque bâbord et de la coque tribord. S'ils sont identiques, C est situé au milieu, sinon il se déplace vers la coque la plus immergée. La résultante aérodynamique est divisée en deux composantes : F_{prop} suivant l'axe d'avancement \vec{x} et F_{der} suivant l'axe transversal \vec{y} . Elle est calculée en prenant en compte uniquement les rotors Flettner. Est ainsi négligée la prise au vent de la carène du navire. Son point d'application est le centre vélique C. Le poids du navire s'applique au centre de gravité G placé en son barycentre des masses. Celui-ci est situé au centre sur l'axe longitudinal \vec{x} . Sa position sur l'axe transversal \vec{y} dépend de la forme des coques bâbord et tribord et du cas d'application. Sa position verticale dépend de la masse et de la position des équipements embarqués, des coques et des rotors Flettner. Comme indiqué sur le schéma II.2a le moteur d'un rotor est situé à la base du cylindre qui est creux dans sa partie haute. Cela permet de supposer que le centre des masses des rotors est situé sur le tiers bas du cylindre. Arbitrairement, on place le centre de gravité à 10 m au dessus de la surface de l'eau, ce qui le situe quelques mètres au-dessus du pont (hypothèse défavorable du point de vue de la stabilité du navire).

$$\begin{cases} F_{prop} + R_H + R_W = 0 \\ mg - \rho_W V g = 0 \\ M_B(\vec{F}_{der}) + M_B(\vec{G}) + M_B(\vec{B}_{bab}) + M_B(\vec{B}_{tri}) = 0 \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

Finalement, on projette l'équation du mouvement (II.2) suivant les trois degrés de liberté considérés (déplacement suivant \vec{x} , déplacement suivant \vec{y} et rotation suivant \vec{x}). On obtient ainsi le système d'équation à résoudre (II.3).

Degrés de liberté du modèle L'angle de dérive qui joue un rôle important dans le comportement d'un voilier n'est pas pris en compte. On souhaite s'assurer l'hypothèse d'un angle de dérive faible est réaliste pour la carène étudiée. On calcule pour cela la surface de plan anti-dérive nécessaire pour maintenir l'angle de dérive inférieur à 2° et à 1°. Le navire est supposé se déplacer à la vitesse de 10 m/s. La force de dérive est d'environ 300kN (soit environ la force propulsive générée par 3 rotors Flettner pour un vent de 10 m/s). Le coefficient de portance d'un plan anti-dérive dépend de son profil et de ses caractéristiques géométriques. On ne prend ici en compte ni la portance générée par la coque, ni les interactions entre la coque et la plan anti-dérive. Les valeurs de portance peuvent être comprises entre 0,02 et 0,05 pour un angle de dérive de 1° et entre 0,04 et 0,10 pour un angle de dérive de 2° (93). Le coefficient de portance est défini par l'équation (II.4). On obtient la surface anti-dérive nécessaire dans l'équation (II.5).

$$F_{L,d} = \frac{1}{2} \rho_W A_{R,d} U^2 C_{L,d} \quad (\text{II.4})$$

$$A_{R,d} = \frac{2 * F_{L,d}}{\rho_W U^2 C_{L,d}} \quad (\text{II.5})$$

Avec $F_{L,d}$ la portance des plan anti-dérive, $A_{R,d}$ leur surface portante et $C_{L,d}$ leur coefficient de portance.

Ainsi, un plan anti-dérive de surface 84 m² est capable de maintenir un angle de dérive inférieur à 2°. Un plan anti-dérive de surface 167 m² est capable de maintenir un angle de dérive inférieur à 1°. Si l'on accepte un angle de dérive de 5°, seul 17 m² sont suffisants. Ces surfaces sont envisageables sur les carènes étudiées qui disposent de deux coques de longueur proches de 80 m.

Pour prendre en compte cet élément avec plus de précision il serait nécessaire de définir les appendices du navire (gouvernails et plans anti-dérive) et d'inclure l'angle de dérive comme degré de liberté supplémentaire. Cela n'a pas été réalisé en raison de la complexification de la définition de la carène (et du nombre de paramètres à optimiser qui en découlent) et de l'augmentation de temps de calcul nécessaire à la résolution du modèle. On souhaite en effet, dans le but d'intégrer ce modèle à un processus d'optimisation, garder un nombre restreint de paramètres et un temps de calcul court.

II.1.2 Efforts aérodynamiques

II.1.2.1 Description des rotors Flettner

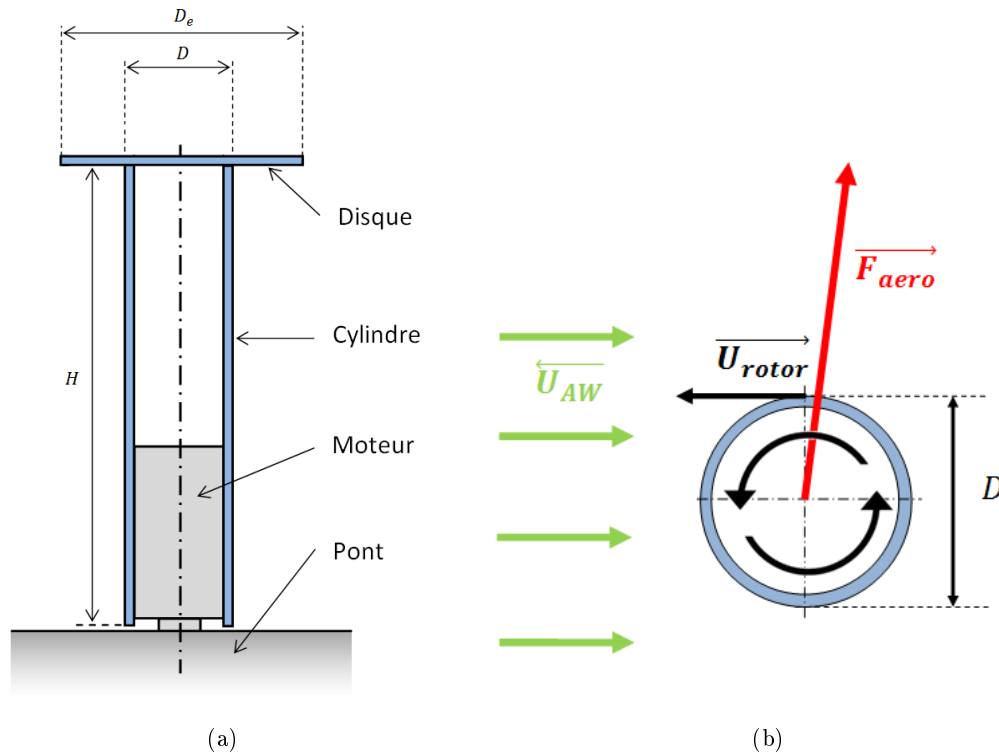


FIGURE II.2 – a) Coupe verticale d'un rotor Flettner avec ses paramètres géométriques principaux. b) Coupe horizontale d'un rotor Flettner avec représentation de la vitesse du vent incident U_{AW} .

Comme indiqué dans le chapitre précédent un rotor Flettner est un cylindre tournant surmonté d'un disque (68; 69). Comme indiqué sur la figure II.2b, lorsque le cylindre est en rotation dans un fluide incident (ici le vent U_{AW}), il crée la résultante aérodynamique F_{aero} . Le tableau II.1 précise les paramètres d'un rotor Flettner : le diamètre du cylindre D , le diamètre du disque supérieur D_e et la hauteur H (voir figure II.2a). La géométrie d'un rotor est caractérisée par sa surface portante A_r (II.6), son rapport d'aspect k_A (II.7) et son rapport de disque k_D (II.8). En fonctionnement, on définit le rapport de vitesse qui est le rapport entre la vitesse du fluide et la vitesse d'un point de la surface du cylindre (II.9) comme indiqué sur la figure II.2b (75; 76).

Paramètre	Description
D	Diamètre du cylindre
D_e	Diamètre du disque supérieur
A_r	Surface portante
k_A	Rapport d'aspect
k_D	Rapport de disque
k_v	Rapport de vitesse
ω	Vitesse de rotation

TABLE II.1 – Paramètres d'un rotor Flettner.

$$A_r = D * H \quad (\text{II.6})$$

$$k_A = \frac{H}{D} \quad (\text{II.7})$$

$$k_D = \frac{D_e}{D} \quad (\text{II.8})$$

$$k_v = \frac{U_{rotor}}{AWS} = \frac{\omega D}{2 * (AWS)} \quad (\text{II.9})$$

avec k_A le rapport d'aspect, k_v le rapport de vitesse, k_D le rapport de diamètre, ω la vitesse de rotation du rotor, D et H le diamètre et la hauteur du cylindre et D_e le diamètre du disque supérieur. AWS est ici la vitesse du fluide incident.

II.1.2.2 Calcul de la force propulsive

Le déplacement de l'air est décrit par deux vecteurs, le vecteur de vent réel (\vec{U}_{TW} pour "True Wind") et le vecteur de vent apparent (\vec{U}_{AW} pour "Apparent Wind"). Le vent réel est le déplacement de l'air par rapport à un repère fixe. Le vent apparent est le déplacement de l'air par rapport au repère du navire. Le vent apparent est donc la soustraction du vecteur de déplacement du navire au vecteur de vent réel (figure II.3 et équation (II.10)). Leurs angles sont respectivement TWA pour le vent réel et AWA pour le vent apparent. L'angle du vent est mesuré à partir de la direction d'avance du navire (navire face au vent $TWA = 0^\circ$, navire vent de travers $TWA = 90^\circ$). Le déplacement vertical de l'air est négligé. On décrit donc les vecteurs de vent apparent et de vent réel dans le plan (x, y) (II.11).

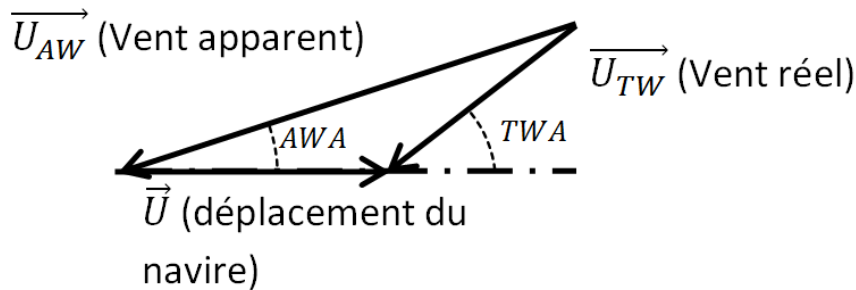


FIGURE II.3 – Schéma vectoriel du vent apparent \vec{U}_{AW} , du vent réel \vec{U}_{TW} et de la vitesse d'avance \vec{U} .

$$\vec{U}_{AW} = \vec{U}_{TW} - \vec{U} \quad (\text{II.10})$$

$$\begin{cases} AWS & = \sqrt{U^2 + (TWS)^2 + 2U(TWS) \cos(TWA)} \\ \sin(AWA) & = \frac{TWS}{AWS} \sin(TWA) \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

La résultante aérodynamique d'un rotor Flettner est calculée à l'aide des coefficients de portance et de traînée selon la formule (II.12). Les coefficients aérodynamiques de portance C_L et de traînée C_D sont extraits d'études expérimentales (68; 75). Issue de (75), la figure II.4 montre le tracé du coefficient de portance (à gauche) et du coefficient de traînée (à droite) en fonction du rapport de vitesse. Comme le montrent ces deux graphiques, le rapport de vitesse permet de faire varier la portance et la traînée du profil. C'est de cette manière que l'on peut régler la force propulsive fournie par un rotor Flettner. Ces courbes montrent également l'importance du paramètre géométrique du rapport de disque sur les performances d'un rotor Flettner.

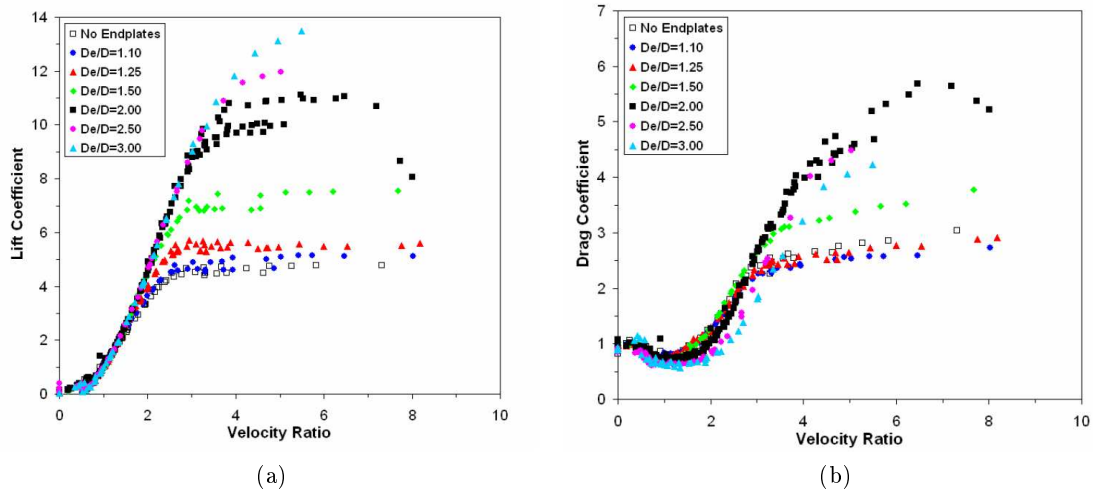


FIGURE II.4 – a) Coefficient de portance en fonction du rapport de vitesse. b) Coefficient de traînée "drag coefficient" en fonction du rapport de vitesse pour un rotor de rapport d'aspect 5,1. (75)

$$\begin{cases} F_L = \frac{1}{2}\rho_{air}A_R(AWS)^2C_L \\ F_D = \frac{1}{2}\rho_{air}A_R(AWS)^2C_D \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

avec F_L la portance du profil, F_D la traînée du profil, ρ_{air} la masse volumique de l'air.

Comme indiqué sur la figure II.5, on projette la portance et la traînée sur l'axe d'avance du navire \vec{x} pour obtenir la force propulsive F_{prop} , et sur l'axe transversal \vec{y} pour obtenir la force de dérive F_{der} . On obtient ainsi les forces propulsives et de dérive en fonction des paramètres du vent incident et des rotors Flettner (II.13).

$$\begin{cases} F_{prop} = \frac{1}{2}\rho_{air}A_R(AWS)^2(C_L \sin(AWA) - C_D \cos(AWA)) \\ F_{der} = \frac{1}{2}\rho_{air}A_R(AWS)^2(C_L \cos(AWA) + C_D \sin(AWA)) \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

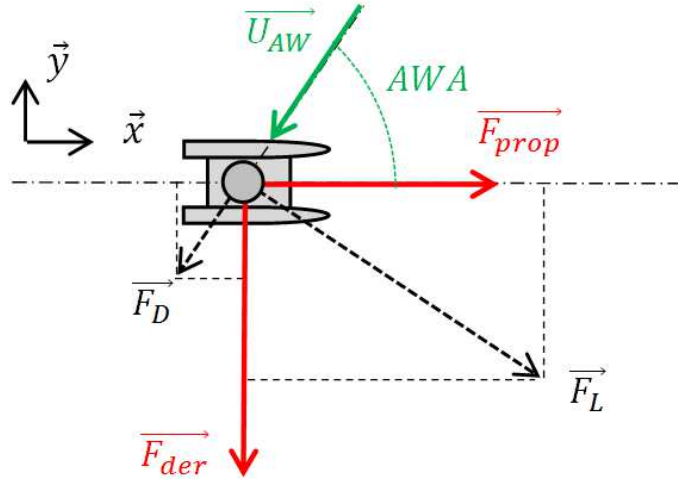


FIGURE II.5 – Schéma du navire vu de dessus (plan (x, y)). La portance et la trainée sont projetées sur les axes \vec{x} et \vec{y} pour obtenir la force propulsive \vec{F}_{prop} et la force de dérive \vec{F}_{der} .

II.1.2.3 Calcul de la hauteur du centre vélique

Le centre vélique est le point d'application de la résultante aérodynamique. Il est calculé par la méthode des tranches. Le profil de vent réel utilisé est celui couramment utilisé pour les éoliennes en mer tel que décrit dans la norme IEC 61400-3 (24) (II.14). On calcule ensuite le vent apparent résultant grâce à l'équation (II.11). On obtient ainsi le profil du vent apparent en fonction de la hauteur z (II.15). Cette équation fait apparaître le coefficient α dont la valeur usuelle pour un vent en mer est de 0,14 (24).

$$TWS(z) = TWS_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad (\text{II.14})$$

$$AWS(z) = \sqrt{U^2 + (TWS_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha)^2 + 2U * (TWS_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha) \cos(TWA)} \quad (\text{II.15})$$

avec TWS_{ref} la vitesse du vent réel à l'altitude z_{ref} .

La figure II.6 montre un exemple de profil de vent apparent pour une vitesse d'avance de 10 m/s, un angle de vent réel de 90° et une vitesse de vent réel à $TWS_{ref}(10m) = 10m/s$. Cette figure permet de mettre en évidence la différence entre le profil du vent réel (tel que pour une éolienne fixe) et le profil du vent apparent (utilisé pour le voilier hydro-éolien se déplaçant).

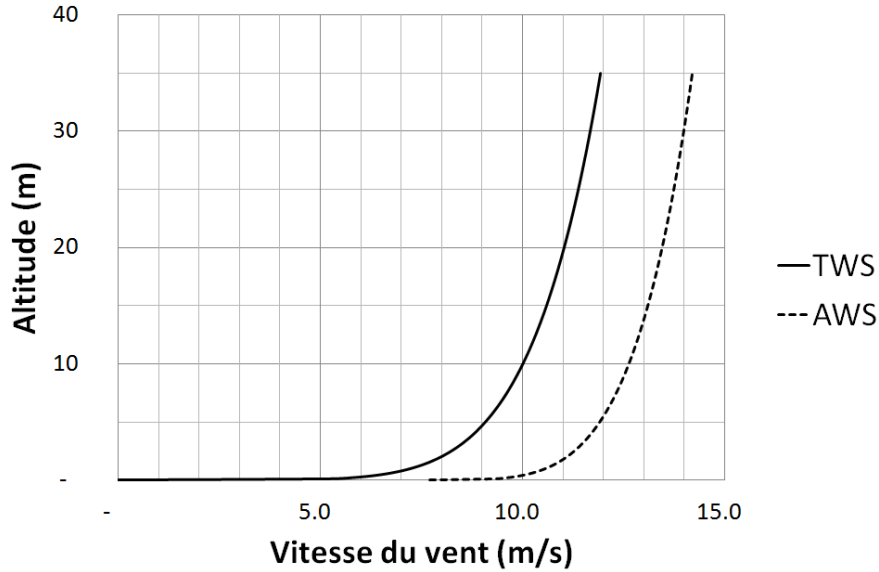


FIGURE II.6 – Vitesse du vent réel (trait plein) et du vent apparent (trait pointillé) en fonction de l'altitude. Avec $U = 10.0\text{m/s}$, $TWS_{ref}(10\text{m}) = 10.0\text{m/s}$ et $TWA = 90.0$.

Par la méthode des tranches, décrite ci-après, on calcule la résultante aérodynamique totale et son point d'application. On discrétise le profil suivant la hauteur en tranches comme indiqué sur le schéma II.7. A chaque tranche, délimitée par la hauteur $z = i$ et $z = i + 1$, on associe la résultante aérodynamique F_i . Comme indiqué dans l'équation (II.16), la résultante F_i est calculée en prenant en compte le vent moyen de la tranche correspondante : $AWS(\frac{z_i + z_{i+1}}{2})$. Enfin, la hauteur du centre vélique z_C est le rapport entre la somme des résultantes F_i pondérées de leur hauteur par la somme des résultantes F_i (voir équation (II.17)). Comme la vitesse du vent est plus importante en haut du profil qu'en bas, le centre vélique est situé plus haut que le milieu du profil.

$$F_i = \frac{1}{2}\rho_{air}A_R(AWS(\frac{z_i + z_{i+1}}{2}))^2\sqrt{C_L^2 + C_D^2} \quad (\text{II.16})$$

$$z_C = \frac{\sum_i(F_i * (\frac{z_i + z_{i+1}}{2}))}{\sum_i F_i} \quad (\text{II.17})$$

Par cette méthode, la cinétique de l'écoulement en trois dimensions n'est pas prise en compte. En particulier, les effets de bord en haut du profil sont négligés. Ces effets ont tendance à diminuer la portance de l'extrémité haute du profil. Le centre vélique réel serait ainsi plus bas que celui calculé par la méthode des tranches. Dans la résolution du mouvement d'un navire, avoir un centre vélique haut augmente le moment de chavirement responsable de la gîte. L'hypothèse retenue pour le calcul est donc une hypothèse désavantageuse par rapport à la cinétique réelle. Ces remarques ne concernent toutefois que le calcul de la hauteur du centre vélique et non la valeur de la résultante aérodynamique. En effet, les coefficients aérodynamique sont extraits de résultats expérimentaux qui prennent en compte la cinétique complète de l'écoulement et les effets de bord (75).

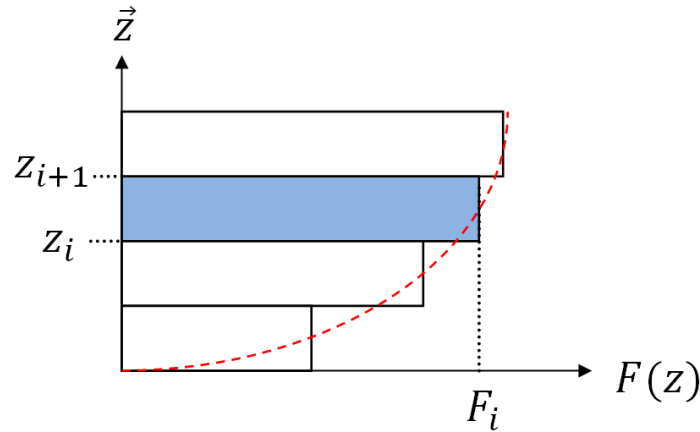


FIGURE II.7 – Courbe de la résultante aérodynamique $F(z)$ en fonction de la hauteur ; représentation des tranches correspondantes.

II.1.3 Efforts hydrodynamiques

Dans cette section est détaillé le modèle hydrodynamique du navire. La partie immergée du navire comprend les coques, les appendices éventuels (gouvernails, plans anti-dérive, hélices de moteur) et les hydrogénérateurs. On traite séparément les hydrogénérateurs et les coques, négligeant ainsi les interactions entre ces deux éléments. Les autres appendices sont négligés. Comme vu dans l'équation du mouvement (II.3), seuls trois degrés de liberté sont considérés (la vitesse d'avance U , l'angle de gîte ϕ et l'enfoncement E).

II.1.3.1 Modélisation des hydrogénérateurs

Pour calculer l'effort du fluide sur les hydrogénérateurs, on considère un flux unidirectionnel uniforme et d'une vitesse constante égale à la vitesse d'avance. Le fluide est incompressible et l'écoulement irrotationnel. Les forces de friction sont négligées. On utilise la théorie de Froude et la méthode de l'"actuator disk" pour calculer la traînée induite par l'hydrogénérateur (II.18) et la puissance électrique générée (II.19) (94).

$$R_H = \frac{1}{2} \rho_W S_H U^2 4a(1-a) \quad (\text{II.18})$$

$$P_H = \frac{1}{2} \rho_W S_H U^3 4a(1-a)^2 \quad (\text{II.19})$$

avec T_H la traînée de l'hydrogénérateur, P_H sa puissance électrique produite, ρ_W la masse volumique de l'eau, S_H la surface balayée par l'hydrogénérateur, U la vitesse du fluide (ici identique à la vitesse d'avance du navire) et a le facteur d'induction.

Dans le cadre de l'application au navire de production, la vitesse du fluide U dépend de la traînée produite R_H elle-même dépendante de U . Cette interdépendance est peu courante dans l'application classique de cette formule (généralement cas de flux de vitesse constante).

II.1.3.2 Géométrie de la carène

Paramètre	Description
L_{tri}, L_{bab}	Longueur de la coque
B_{tri}, B_{bab}	Largeur de la coque
D_{tri} et D_{bab}	Profondeur de la coque
$Inter$	Écartement entre les deux coques
Δ_z	Hauteur de la coque bâbord par rapport à la coque tribord

TABLE II.2 – Paramètres de définition de la carène.

On étudie les carènes de type catamaran, symétriques ou non. Le tableau II.2 dresse la liste des paramètres utilisés. Chaque coque est définie par sa longueur L , sa largeur B et sa profondeur D . L'attribut $.tri$ est donné aux paramètres de la coque tribord et l'attribut $.bab$ est donné aux paramètres de la coque bâbord. Ainsi, les six paramètres de forme de coque sont : L_{tri} , L_{bab} , B_{tri} , B_{bab} , D_{tri} et D_{bab} . Le positionnement relatif des deux coques est défini par leur écartement $Inter$ et la hauteur relative de la coque bâbord par rapport à la coque tribord est notée Δ_z . Une carène complète est donc définie par un jeu de huit paramètres tel que décrits sur la figure II.8.

Sur cette figure sont aussi représentés les axes de la modélisation : l'axe \vec{x} est la direction d'avance du navire, l'axe \vec{y} est la direction transversale et l'axe \vec{z} est la direction verticale.

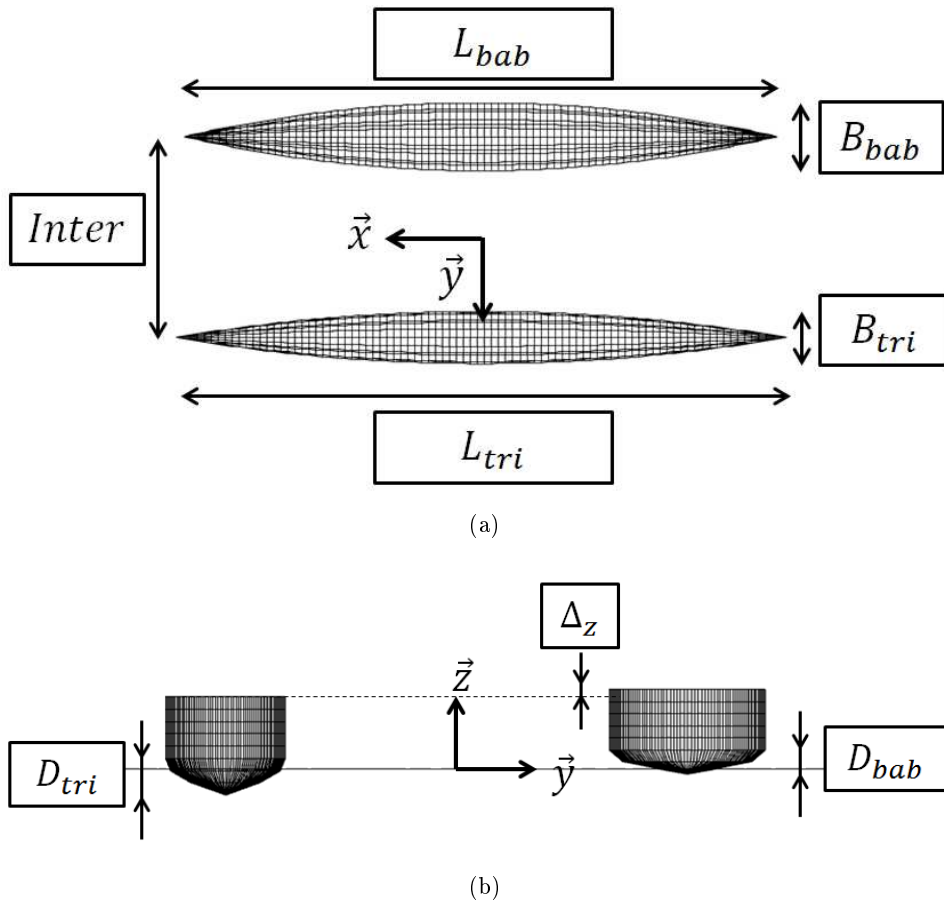


FIGURE II.8 – Schéma d'une carène de type Wigley parabolique et identification de ses paramètres : a) Vue de dessus. b) Vue de face.

La description de la forme des coques se fait de manière analogique par le biais d'une équation de forme. Une équation de forme est une équation reliant les trois coordonnées spatiales x , y et z . Les points de l'espace qui satisfont l'équation de forme sont situés sur la surface de la coque. L'équation de forme choisie est une équation de type Wigley parabolique qui permet de développer des carènes fines avec des formes courbes (grâce aux composantes paraboliques de l'équation de forme). Sa forme générale est donnée dans l'équation (II.20). On applique cette équation aux paramètres désignés pour les coques tribord et bâbord. L'équation de forme de la coque tribord s'écrit ainsi (II.21) et l'équation de forme de la coque bâbord s'écrit (II.22).

$$y(x, z) = \frac{B}{2} \left(1 - \left(\frac{z^2}{D^2}\right)\right) \left(1 - \frac{4x^2}{L^2}\right) \quad (\text{II.20})$$

Avec x la largeur du la coque, D la profondeur et L la longueur.

$$y(x, z) = \frac{Inter}{2} + \frac{B_{tri}}{2} \left(1 - \left(\frac{z^2}{D_{tri}^2}\right)\right) \left(1 - \frac{4x^2}{L_{tri}^2}\right) \quad (\text{II.21})$$

$$y(x, z) = -\frac{Inter}{2} + \frac{B_{bab}}{2} \left(1 - \left(\frac{(z - \Delta_z)^2}{D_{bab}^2}\right)\right) \left(1 - \frac{4x^2}{L_{bab}^2}\right) \quad (\text{II.22})$$

II.1.3.3 Calcul de la résistance à l'avancement de la carène

Définition des coefficients hydrodynamiques La résistance de la coque sans appendice et sans les hydrogénérateurs est calculée suivant la formule de l'ITTC (International Towing Tank Conference) (95; 96) (II.23). Le coefficient de forme k , faible pour les coques minces, est négligé. Le coefficient de friction, suivant la même référence est calculé par l'équation (II.24). Le coefficient résiduel C_r est calculé par l'intermédiaire d'un code potentiel. Cette méthode est mise en place par le logiciel dédié REVA. La plage de vitesse d'avance attendue est d'environ 10 m/s. On calcule donc le coefficient de résistance résiduel sur une plage d'angle de gîte de 0 à 5° et de vitesse de 0 à 20 m/s. Les longueurs de coques étudiées (longueur de référence) étant de 40 m à 90 m, la plage de nombre de Froude correspondante est de 0 à 0,82.

$$R_W = \frac{1}{2} \rho_W S_W U^2 (1 + k) (C_f + C_r) \quad (\text{II.23})$$

avec C_f le coefficient de résistance visqueuse, C_r le coefficient de résistance résiduelle, k le coefficient de forme et U la surface mouillée.

$$C_f = \frac{0.075}{(\log_{10} Re - 2)^2} \quad (\text{II.24})$$

Définition des maillages pour le calcul de C_r Pour le calcul de C_r réalisé par REVA, deux maillages sont utilisés : le maillage de la carène (réalisé en amont de REVA) et le maillage de la surface libre (réalisé par REVA). Le maillage de la carène qui est très rapide peut être réalisé aussi finement que souhaité. Le maillage de la surface en revanche, déterminant pour le temps de calcul, doit être ajusté.

On réalise le maillage de la surface libre avec une densité uniforme sur toute la surface. La densité de maillage est décrite grâce au paramètre λ (II.25). Selon les recommandations de la documentation de REVA, le maillage doit comporter 35 mailles par longueur de référence (ici la longueur de la coque L). La densité de maillage recommandé par REVA est utilisé pour cette étude.

$$\frac{\lambda}{L} = 2\pi F_r^2 \quad (\text{II.25})$$

avec λ la longueur d'onde, L la longueur de référence (ici la longueur de la carène) et F_r le nombre de Froude.

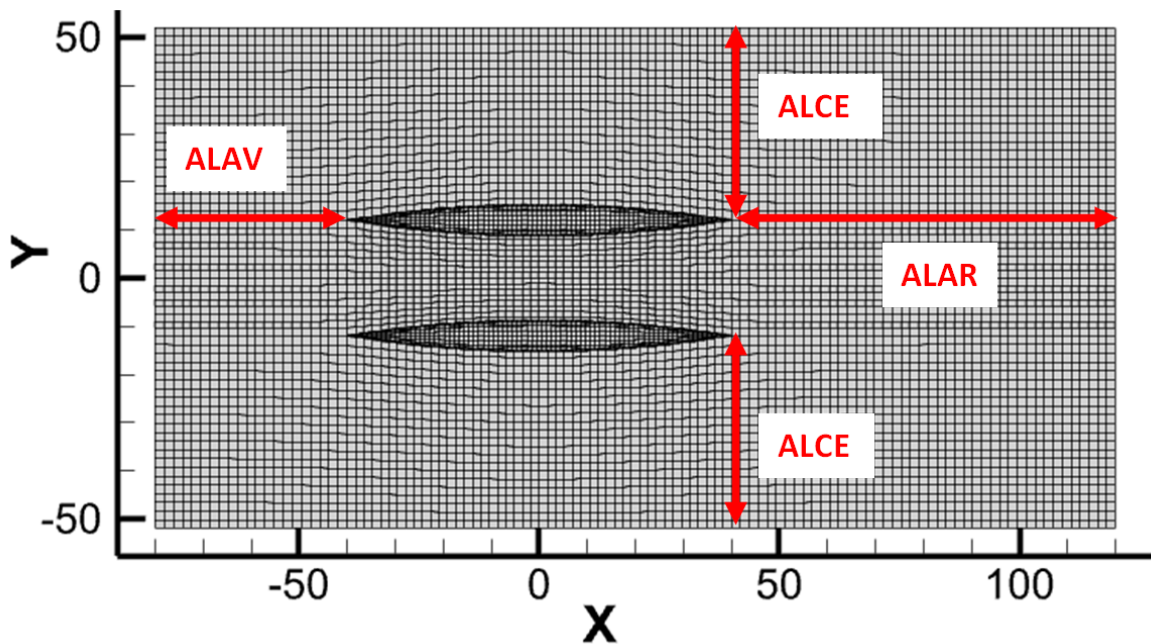
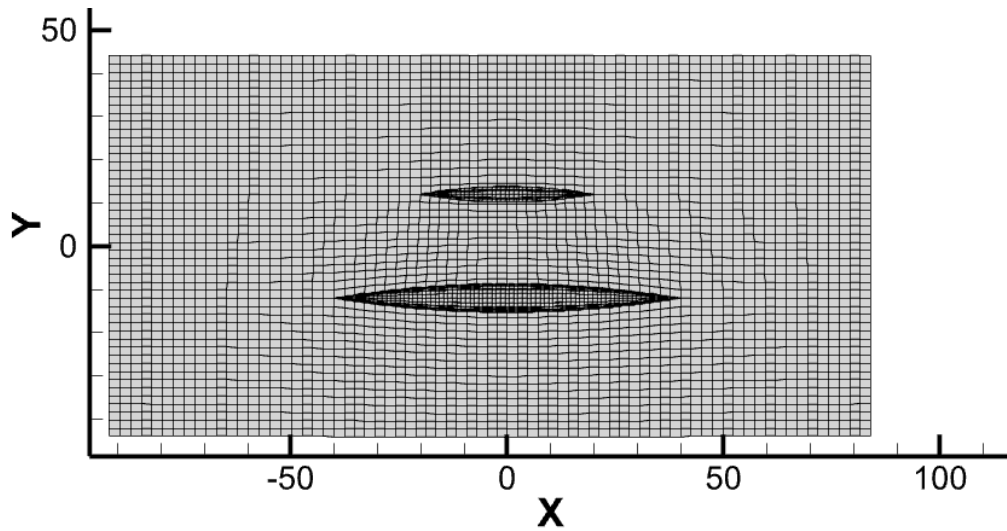


FIGURE II.9 – Paramètres de maillage de la surface libre.

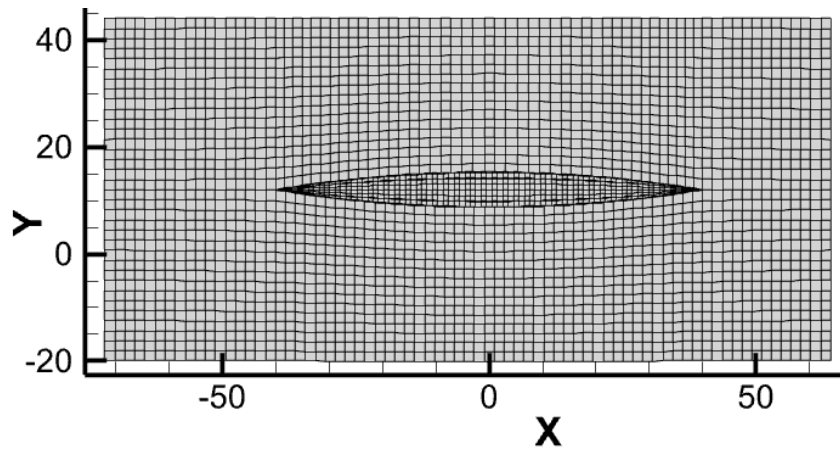
On définit l'envergure de la surface libre par trois paramètres : la longueur en amont de la coque *ALAV*, la longueur en aval de la coque *ALAR* et la longueur sur les côtés de la coque *ALCE*. La figure II.9 montre le positionnement de ces paramètres sur un exemple de surface libre. Chaque paramètre est décrit par un rapport avec la longueur de référence (c'est-à-dire la longueur de la coque) afin de s'adapter à différentes carènes. Par exemple on utilisera le rapport $ALAV/L$ pour décrire la longueur de la surface libre en amont de la coque.

Le maillage doit s'adapter à plusieurs formes de carènes et notamment aux catamarans non symétriques. Dans ce cas, la longueur de référence est la plus grande longueur de coque. Le maillage est également adapté de manière à obtenir un maillage de densité uniforme. La figure II.10a montre un exemple de maillage uniforme de catamaran non symétrique.

Suivant la forme de la carène ou lorsque l'angle de gîte est important, seule une coque est dans l'eau. Dans ce cas, la surface libre n'est maillée qu'autour de la coque immergée comme le montre la figure II.10b. Les paramètres de distance amont, aval et sur les cotés sont identiques à ceux utilisés pour un catamaran classique (avec les deux coques immergés). Il est nécessaire de signifier à REVA le nombre de coques immergées afin d'éviter un chevauchement du maillage.



(a)



(b)

FIGURE II.10 – a) Exemple de maillage adaptée à une carène non symétrique. b) Exemple de maillage adapté à une carène dont une seule coque est immergée.

Vérification du calcul de C_r On recherche les sources d'erreur numériques commises par le calcul en code potentiel (calcul de C_r) afin de les évaluer. Selon la procédure préconisée par l'ITTC (95), l'erreur numérique est la somme de tous les types d'erreurs c'est-à-dire les erreurs dues : au nombre d'itérations, au maillage, au pas de temps et aux autres paramètres (II.26). Pour un code potentiel en régime stationnaire, il n'y a pas de pas de temps et donc pas d'erreur due au pas de temps. Il n'y a pas non plus d'erreur due aux autres paramètres. L'erreur numérique totale se résume donc à (II.27).

$$\Delta_{SN} = \Delta_I + \Delta_G + \Delta_T + \Delta_P \quad (\text{II.26})$$

$$\Delta_{SN} = \Delta_I + \Delta_G \quad (\text{II.27})$$

avec Δ_{SN} l'erreur numérique totale, Δ_I l'erreur due au nombre d'itérations, Δ_G l'erreur due au maillage, Δ_T l'erreur due au pas de temps et Δ_P l'erreur due aux autres paramètres.

Étude de convergence de maillage On réalise une étude de convergence de maillage pour évaluer l'erreur de maillage Δ_G . La configuration de l'étude de cas est la suivante. Le coefficient de résistance résiduelle C_r est calculé pour la vitesse de 10 m/s. La carène utilisée est un catamaran symétrique de longueur 80 m et dont les paramètres sont disponibles dans le tableau II.3. L'enfoncement et l'assiette sont fixés pour cette étude. L'enfoncement sera étudiée dans le paragraphe suivant "Estimation de l'erreur due au nombre d'itérations". Pour chaque maillage testé, on calcule l'écart de coefficient de résistance résiduel obtenu avec le maillage testé et avec le maillage de référence suivant l'équation (II.28). La référence pour déterminer l'erreur est le calcul réalisé avec le maillage le plus étendu.

$$\Delta_G = \frac{C_r - C_r^{ref}}{C_r^{ref}} \quad (\text{II.28})$$

Avec C_r le coefficient de résistance résiduel du maillage testé et C_r^{ref} le coefficient de résistance résiduel du maillage de référence.

Paramètre	Valeur
Type de carène	Catamaran symétrique
Équation de forme	Wigley parabolique
L	80,0 m
B	6,67 m
D	1,88 m
<i>Inter</i>	24,0 m
Déplacement	460 t

TABLE II.3 – Caractéristiques de la carène utilisée pour la vérification.

Les résultats sont écrits dans une matrice à 3 dimensions (c'est-à-dire une dimension par paramètre étudié). Les dimensions de la surface libre de référence sont indiquées dans le tableau II.4. Son maillage est représenté sur la figure II.11. Ce maillage possède 17 200 mailles. Il est proche du nombre de maille maximal acceptable par REVA (maximum de 20 000 mailles). Pour le paramètre $ALCE/L$ la plage d'étude est étendue jusqu'à la valeur 1,0 lorsque cela est possible (lorsque le nombre de maille est inférieur à 20 000). Les dimensions de la surface libre la plus petite utilisée pour l'étude sont indiqués dans le tableau II.4. Le maillage est représenté sur la figure II.12.

Paramètre	Maillage de référence	Plus petit maillage
$ALAV/L$	2,0 m	0,25 m
$ALAR/L$	2,0 m	0,25 m
$ALCE/L$	0,75 m	0,25 m

TABLE II.4 – Caractéristiques des maillages de surface libre de référence II.11 et minimal II.12.

La figure II.13 page 82 présente la matrice de résultat de la validation du maillage. Chaque table montre les écarts en pourcentage avec le maillage de référence en fonction de $ALAV/L$ (en abscisse) et de $ALAR/L$ (en ordonnée). Chaque table est réalisée pour une valeur de $ALCE/L$ différente. Une échelle de couleur permet lire la matrice : rouge $\Delta_G > 8\%$, orange $4\% < \Delta_G < 8\%$, vert $\Delta_G < 4\%$. La figure II.14 page 83 est un détail de la matrice II.13c.

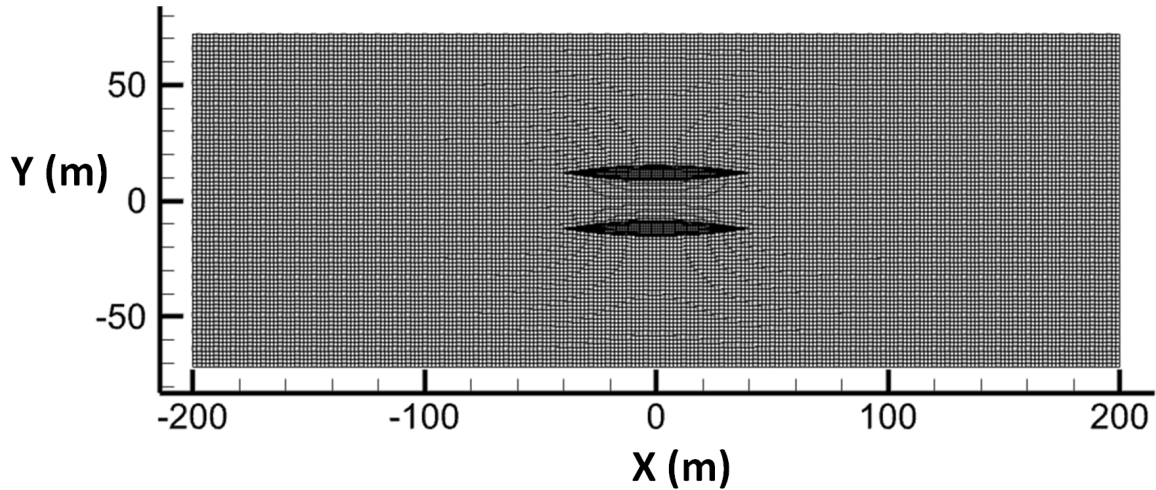


FIGURE II.11 – Maillage de surface libre de référence.

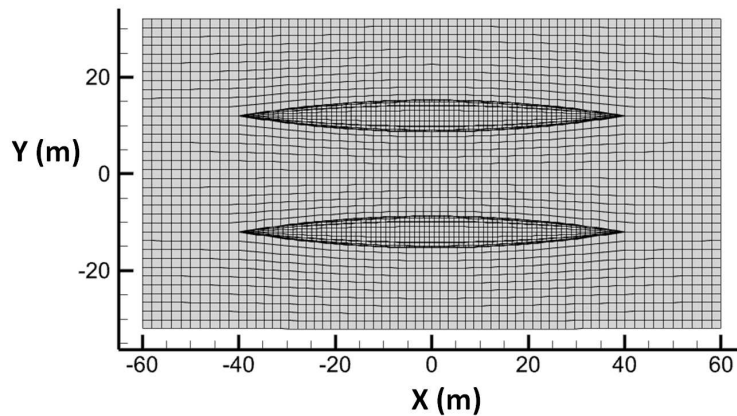


FIGURE II.12 – Maillage de surface libre minimal.

L'erreur de calcul avec $ALCE/L < 0,5$ (tableau II.13d) est toujours importante (9 à 15% d'écart). Les erreurs avec $ALAV/L < 0,5$ sont également importantes (plus de 5% d'écart) (première colonne de chaque tableau).

Il y a une zone avec des erreurs importantes mais un maillage très étendu : zone avec $ALAR/L = 2,0$ excepté pour la valeur $ALCE/L = 0,5$ (première ligne de chaque table). La source d'erreur de cette zone n'a pas été identifiée. Cette taille de maillage (maillages étendus) est cependant assez éloignée des maillages sélectionnés par la suite.

La zone intéressante est la zone : $ALAV/L \in [0, 25; 0, 5]$; $ALAR/L \in [0, 25; 0, 5]$; $ALCE/L = 0,5$ (carré en bas à gauche de la table II.13c). C'est en effet la zone comprenant les plus petits maillages avec une erreur acceptable (de 0 à 5% d'écart). On effectue quelques cas complémentaires pour affiner cette zone (voir figure II.14 page 83).

Finalement, le maillage retenu possède les paramètres suivants : $ALAV/L = 0,4$; $ALAR/L = 0,3$; $ALCE/L = 0,4$. Il possède un écart de 4,2% par rapport au maillage de référence. Il possède 3600 mailles soit environ 5 fois moins de mailles que le maillage de référence.

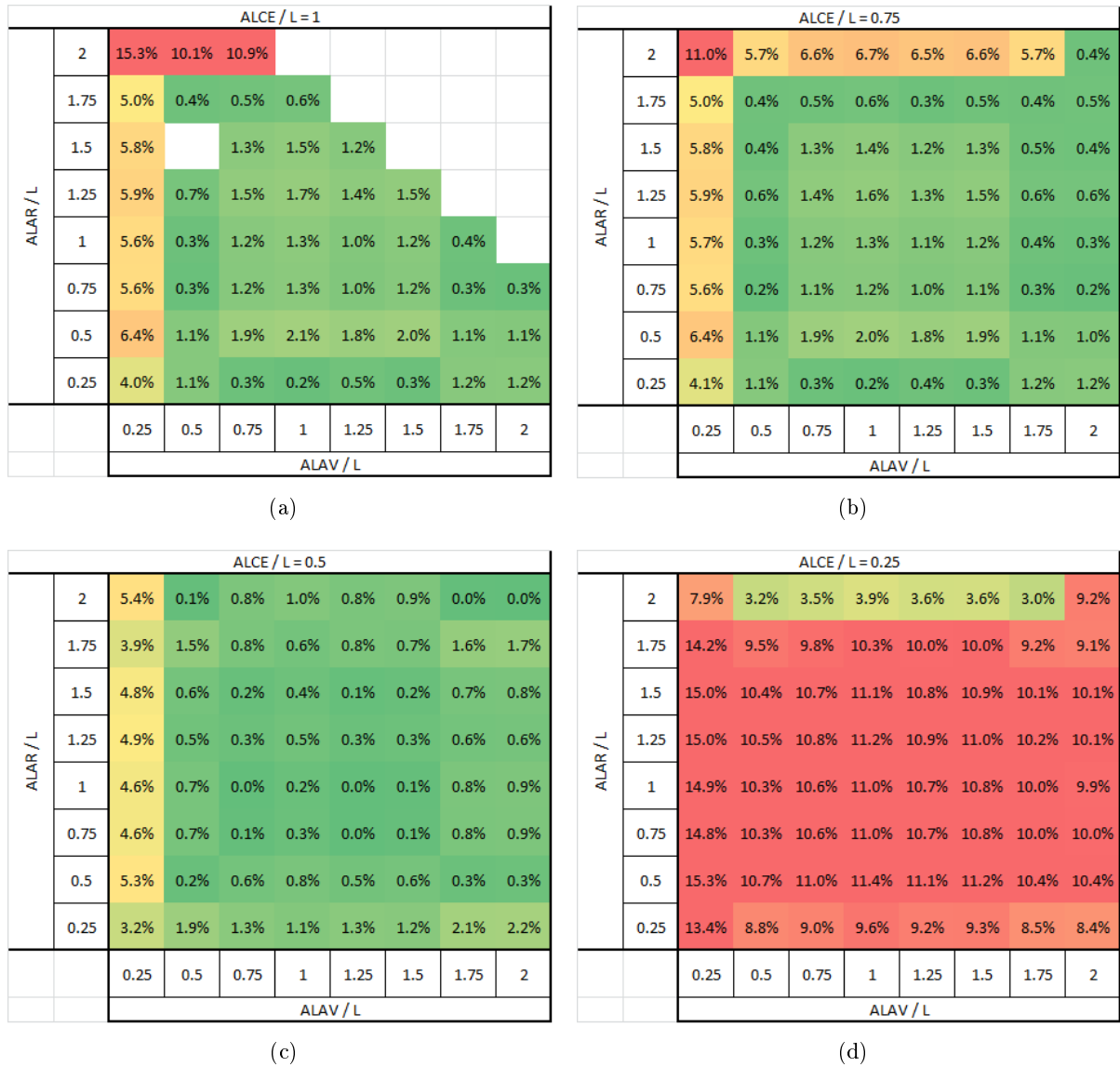


FIGURE II.13 – Matrices des écarts de C_r de différents maillages par rapport au résultat obtenu avec le maillage de référence (suivant la formule (II.28)).

		ALCE / L = 0.5							
ALAR / L	2	5.4%	0.1%	0.8%	1.0%	0.8%	0.9%	0.0%	0.0%
	1.75	3.9%	1.5%	0.8%	0.6%	0.8%	0.7%	1.6%	1.7%
	1.5	4.8%	0.6%	0.2%	0.4%	0.1%	0.2%	0.7%	0.8%
	1.25	4.9%	0.5%	0.3%	0.5%	0.3%	0.3%	0.6%	0.6%
	1	4.6%	0.7%	0.0%	0.2%	0.0%	0.1%	0.8%	0.9%
	0.75	4.6%	0.7%	0.1%	0.3%	0.0%	0.1%	0.8%	0.9%
	0.5	5.3%	0.2%	0.6%	0.8%	0.5%	0.6%	0.3%	0.3%
	0.25	3.2%	1.9%	1.3%	1.1%	1.3%	1.2%	2.1%	2.2%
			0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75
		ALAV / L							

		ALCE / L = 0.5			
ALAR / L	0.5	7.3%	3.6%	0.3%	0.4%
	0.4			1.0%	
	0.3			0.5%	
	0.2			1.5%	
		0.2	0.3	0.4	0.5
		ALAV / L			

(a)

		ALCE / L = 0.4			
ALAR / L	0.5				
	0.4				
	0.3			0.8%	
	0.2				
		0.2	0.3	0.4	0.5
		ALAV / L			

(b)

		ALCE / L = 0.3			
ALAR / L	0.5				
	0.4				
	0.3			4.2%	
	0.2				
		0.2	0.3	0.4	0.5
		ALAV / L			

(c)

		ALCE / L = 0.2			
ALAR / L	0.5				
	0.4				
	0.3			15.5%	
	0.2				
		0.2	0.3	0.4	0.5
		ALAV / L			

(d)

FIGURE II.14 – Détail de la matrice II.13c des écarts de C_r de différents maillages par rapport au résultat obtenu avec le maillage de référence (suivant la formule (II.28)).

Estimation de l'erreur due au nombre d'itérations On estime l'erreur due à l'itération choisie Δ_I . Pour cela on effectue une simulation et on enregistre les résultats jusqu'à 6 itérations. A chaque itération, on recalcule l'enfoncement afin de repositionner la carène verticalement (déplacement suivant l'axe \vec{z}). Les efforts hydrodynamiques calculés à l'itération précédente sont pris en compte dans le calcul de l'enfoncement. Le graphique II.15 montre les résultats de cette étude. Sur ce graphique chaque couleur représente les résultats pour un nombre de Froude différent (de gris pour $F_r = 0.11$ à orange pour $F_r = 0.50$).

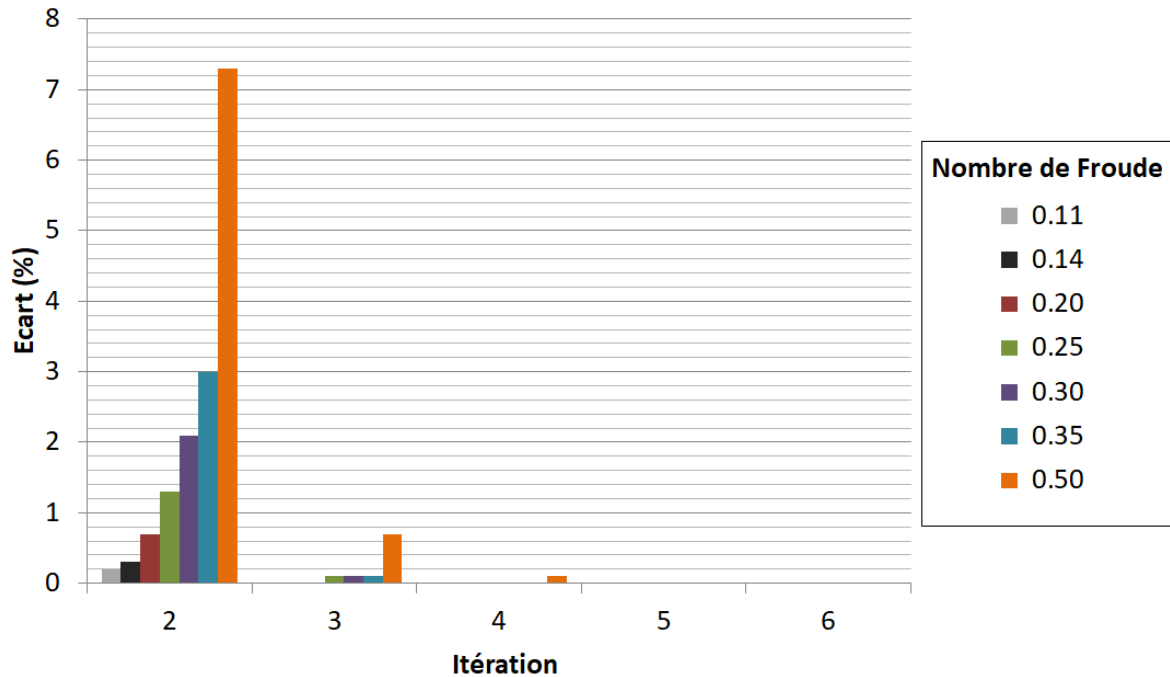


FIGURE II.15 – Écart de résistance à l'avancement par rapport au résultat obtenu à l'itération précédente. Chaque couleur correspond à un nombre de Froude (de 0,11 à 0,50).

Dans tout les cas, il y a moins de 1% d'écart à partir de l'itération 3. Deux itérations suffisent donc pour toutes les simulations en dessous de $F_r = 0.50$. On remarque également que l'erreur augmente avec le nombre de Froude. L'écart entre l'itération 1 et 2 est autour de 3% jusqu'à un nombre de Froude de 0,35.

Compte tenu que le temps de calcul de deux itérations est double par rapport à un calcul pour une itération, il est choisi de ne réaliser qu'une seule itération (le temps d'évaluation complet d'un navire tel que présenté dans l'étude de cas de ce chapitre est d'environ 30 mn, le temps de calcul d'une optimisation telle que celles présentées dans le chapitre III est de plusieurs semaines). L'erreur retenue due au nombre d'itération est donc $\Delta_I = 3\%$.

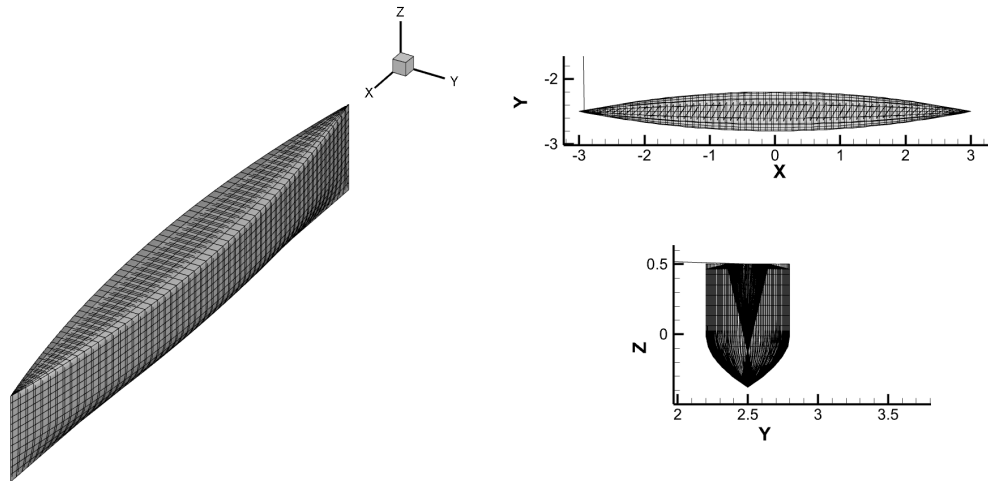


FIGURE II.16 – Représentation du maillage de la carène (à gauche représentation 3D, en haut à droite vue de dessus, en bas à droite vue de face).

Validation du calcul des coefficient de résistance On valide le calcul des coefficients de résistance par comparaison avec un résultat expérimental (97). La carène utilisée est un wigley parabolique monocoque de déplacement 0.628 t. Elle est représentée sur la figure II.16 et ses dimensions sont indiquées dans le tableau II.5. La comparaison est réalisée sur une plage de nombre de Froude étendue (de 0,05 à 0,5). Le résultat expérimental est comparé avec une simulation sur REVA. On utilise les paramètres de maillage optimaux décrits précédemment et une seule itération. On réalise également une deuxième simulation avec le maillage de référence afin d'obtenir une comparaison des résultats des deux maillages sur toute la plage de vitesse étudiée. Bien que seul le coefficient de résistance résiduel doit être calculé par REVA, on compare les trois coefficients hydrodynamiques : le coefficient de résistance résiduel C_r , le coefficient de résistance visqueuse C_f et coefficient total C_t (le coefficient de résistance total est la somme des coefficients de résistance visqueuse et résiduel).

Paramètre	Valeur
Type de carène	Monocoque
Équation de forme	Wigley parabolique
L	6,0 m
B	0,60 m
D	0,38 m
m	0,628 t

TABLE II.5 – Caractéristiques de la carène utilisée pour la validation.

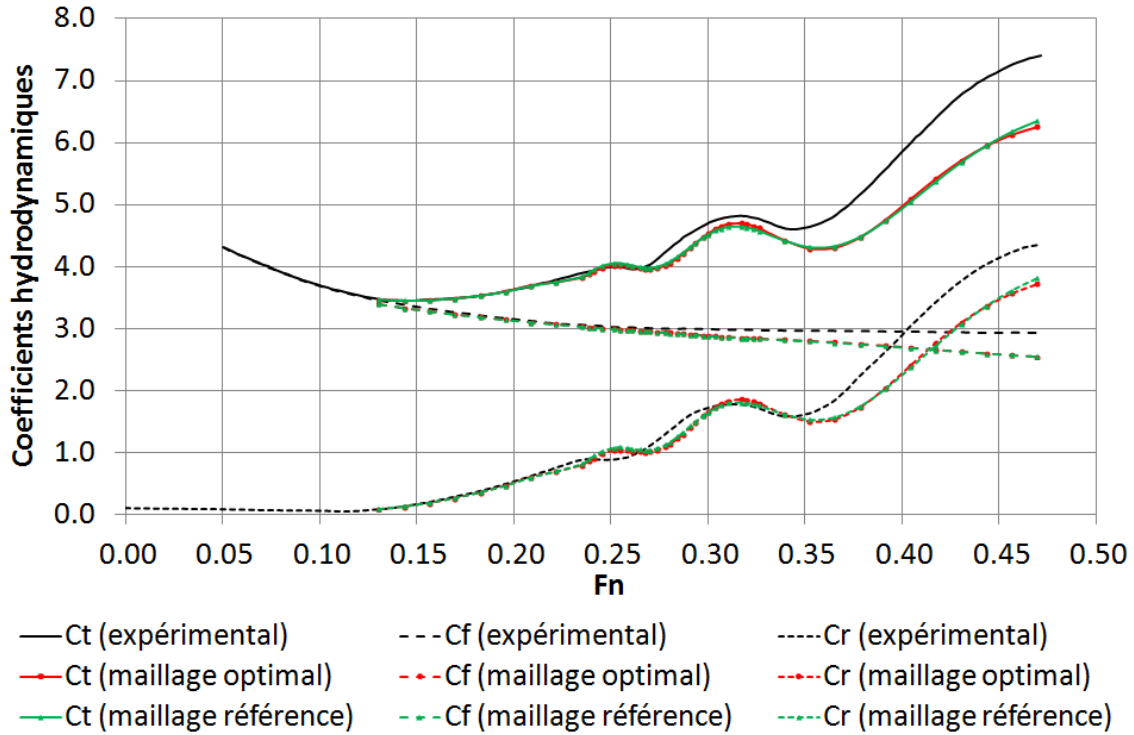


FIGURE II.17 – Coefficients de friction (en vert), résiduel (en bleu) et total (en rouge) en fonction du nombre de Froude (F_n). Les courbes en pointillés sont obtenus par REVA, les courbes en trait plein sont extraites de la référence expérimentale (97).

Le graphique II.17 présente les résultats obtenus. Les résultats expérimentaux sont représentés en noir, ceux obtenus avec le maillage optimal en rouge et ceux obtenus avec le maillage de référence en vert. On remarque une excellente corrélation entre les deux types de maillage sur toute la plage de vitesse. Cela confirme les paramètres de maillage sélectionnés. Il y a cependant un écart entre les résultats expérimentaux et les résultats de REVA. Cet écart augmente avec le nombre de Froude. Si l'on observe le coefficient de résistance résiduel uniquement, on distingue trois zones :

- Une zone d'excellente corrélation pour les faibles vitesses (écart de 0 à 10% pour $F_n < 0.23$).
- Une zone corrélation correcte pour les vitesses moyennes (écart de 10 à 15% pour $0.23 < F_n < 0.36$).
- Une zone de corrélation moyenne pour les vitesses élevées (écart de 15% pour $F_n > 0.36$).

Finalement, on retiendra les deux valeurs suivantes. Pour $F_n < 0.36$, l'écart entre les résultats expérimentaux et ceux donnés par REVA sont de 0 à 15%. Cette valeur est satisfaisante pour le niveau de modélisation souhaité. Pour $F_n > 0.36$, l'écart se stabilise à une valeur de 15%. Bien que moins précis, les résultats obtenus avec cette erreur sont suffisamment corrects pour estimer la production d'énergie du navire et pour comparer plusieurs carènes entre elles.

II.1.4 Calcul de la puissance nette

On calcule la puissance électrique produite par les hydrogénérateurs. Il s'agit de la puissance électrique qui est disponible pour la transformation chimique de l'énergie puis son stockage. Ce calcul prend en compte le rendement électrique des hydrogénérateurs η et une estimation de la consommation du navire. Les consommations des sources auxiliaires sont négligées (propulsion motorisée auxiliaire, alimentation électrique des instruments de bord, etc). La consommation principale est celle des rotors Flettner.

Selon la documentation de la compagnie Norsepower qui réalise des rotors Flettner pour la propulsion assistée de cargo (73), la consommation maximale d'un rotor est de 90 kW. En pratique, comme les rotors ne tournent pas toujours à vitesse maximale cette consommation est plus faible. Toutefois, il est difficile de tracer la courbe de consommation en fonction de la vitesse de rotation du rotor sans données plus précises (type et montage des paliers pour évaluer les frottements par exemple). Par conséquent, la consommation d'un rotor est fixée à sa valeur maximale de 90 kW. La puissance électrique nette P_{net} produite par le navire s'écrit donc (II.29).

$$P_{net} = \eta P_H - P_{rotors} \quad (\text{II.29})$$

II.2 Implémentation

II.2.1 Stratégie de calcul

L'objectif du calcul est d'obtenir la puissance électrique nette du navire telle que définie dans la section précédente (II.29). On doit pour cela résoudre son équation du mouvement (II.1). Cette équation n'est toutefois pas résoluble immédiatement car certaines forces dépendent de la vitesse du navire encore inconnue à ce stade.

Une stratégie de calcul en trois étapes est mise en place comme schématisé sur la figure II.18. Premièrement on calcule 4 surfaces de réponse pour les valeurs suivantes : l'enfoncement E , la surface mouillée S_W , le moment de redressement M_r et le coefficient de résistance résiduelle de la carène C_r . Les paramètres dits statiques (l'enfoncement, la surface mouillée et le moment de redressement) sont calculés pour une plage d'angle de gîte ϕ et le paramètre dit dynamique (la résistance résiduelle) est calculé pour une plage d'angle de gîte ϕ et de vitesse d'avance U . Deuxièmement, l'équation du mouvement est résolue pour plusieurs points de fonctionnement. Un point de fonctionnement est défini par le facteur d'induction des hydrogénérateurs a et le rapport de vitesse des rotors Flettner k_v . Troisièmement, le point de fonctionnement optimal défini par le couple (a_{opt}, k_{v-opt}) est choisi. Le point de fonctionnement optimal est celui qui obtient la meilleure puissance produite tout en satisfaisant les contraintes définies par le cas étudié. On obtient ainsi la puissance maximale produite par le navire.

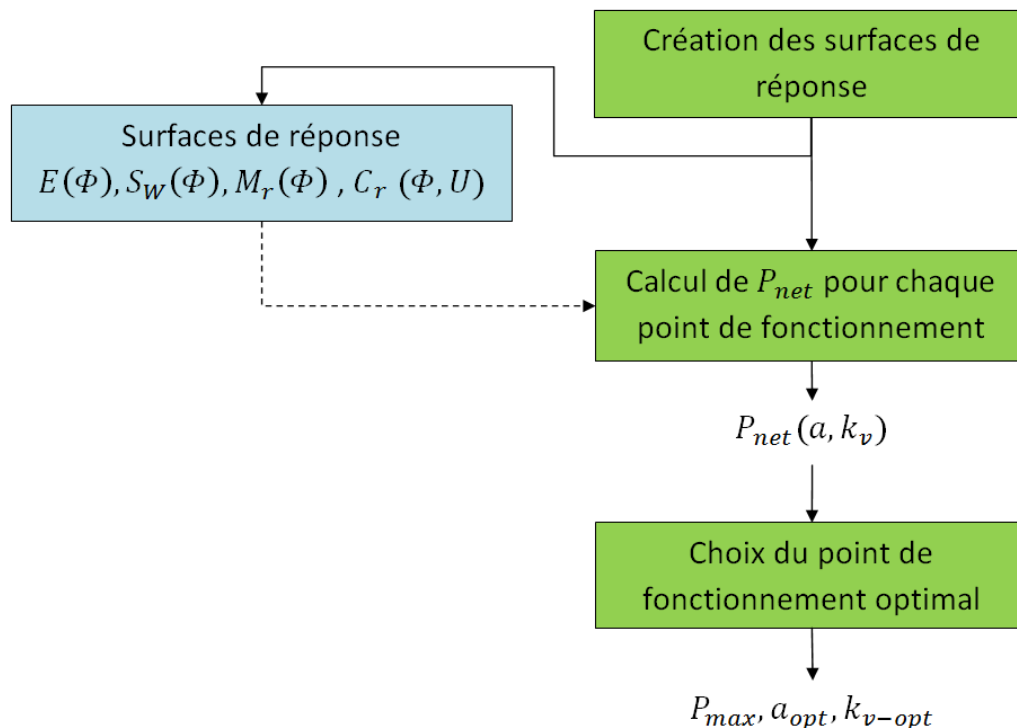


FIGURE II.18 – Stratégie de calcul en trois étapes.

II.2.2 Calcul des surfaces de réponse

Dans cette étape du calcul, on crée une surface de réponse pour quatre paramètres de l'équation du mouvement : l'enfoncement E , la surface mouillée S_W , le moment de redressement M_r et le coefficient de résistance résiduelle de la carène C_r . Ces surfaces de réponse seront utiles pour le calcul de la puissance nette (étape 2 du calcul). En amont de ce calcul, la carène est maillée automatiquement grâce à l'équation de forme définie précédemment (II.21) (II.22).

Surfaces de réponse à une dimension L'enfoncement, la surface mouillée et le moment de redressement sont déterminés par un calcul statique. Ils sont calculés en fonction de l'angle de gîte ϕ . Pour chaque angle de gîte, la procédure suivante est réalisée. La surface libre est identifiée comme le plan (x,y) d'équation $z = 0$. On place la carène maillée à la hauteur z_{eq} telle que son volume immergé (c'est-à-dire le volume de carène situé sous la surface mouillée) soit solution de l'équation du mouvement suivant l'axe vertical \vec{z} (II.1). L'enfoncement E est calculé par la formule (II.30). La surface mouillée est déterminée grâce au maillage (surface maillée située sous la surface libre). Le moment de redressement est la somme des moments dus au poids et à la poussée d'Archimède sur l'axe \vec{x} (II.31). On passe ensuite au prochain angle de gîte.

$$E = -(z_{eq} - z_0) \quad (\text{II.30})$$

$$M_r = M_P + M_A \quad (\text{II.31})$$

avec z_{eq} la hauteur de la coque en position d'équilibre, z_0 la hauteur initiale de la coque, M_r le moment de redressement, M_P le moment dû au poids et M_A le moment dû à la poussée d'Archimède.

Surface de réponse à deux dimensions Le coefficient de résistance résiduel C_r est dit dynamique. Il est calculé en fonction de l'angle de gîte ϕ et de la vitesse d'avance U . Le calcul est réalisé avec le logiciel REVA basé sur la théorie des écoulements potentiels II.1.3.3. Les fichiers d'entrée de REVA comprennent la carène maillée et les paramètres de maillage de la surface libre (tels que définis lors de la vérification et validation II.1.3.3 II.1.3.3). L'enfoncement, calculé précédemment, est également nécessaire car il permet de déterminer le nombre de coques immergées. Selon l'étude de convergence réalisée II.1.3.3, une seule itération est réalisée. L'enfoncement de la carène n'est donc réalisé qu'une seule fois, en position de repos c'est-à-dire avec $U = 0$.

II.2.3 Calcul de la puissance produite

La procédure de calcul de la puissance produite est représentée sur la figure II.19. Elle consiste en deux boucles imbriquées. La boucle interne permet le calcul de la vitesse d'avance à l'équilibre U_{eq} . La boucle externe permet le calcul de l'angle de gîte à l'équilibre ϕ_{eq} . Les deux boucles permettent ainsi le calcul de la position d'équilibre du navire définie par le couple $(U_{eq}; \phi_{eq})$. A chaque cycle de calcul de U , la surface de réponse de C_r est mise à jour. A chaque cycle de calcul de ϕ , toutes les surfaces de réponse sont mise à jour. Les valeurs initiales ϕ_{init} et U_{init} sont fixées à 0.

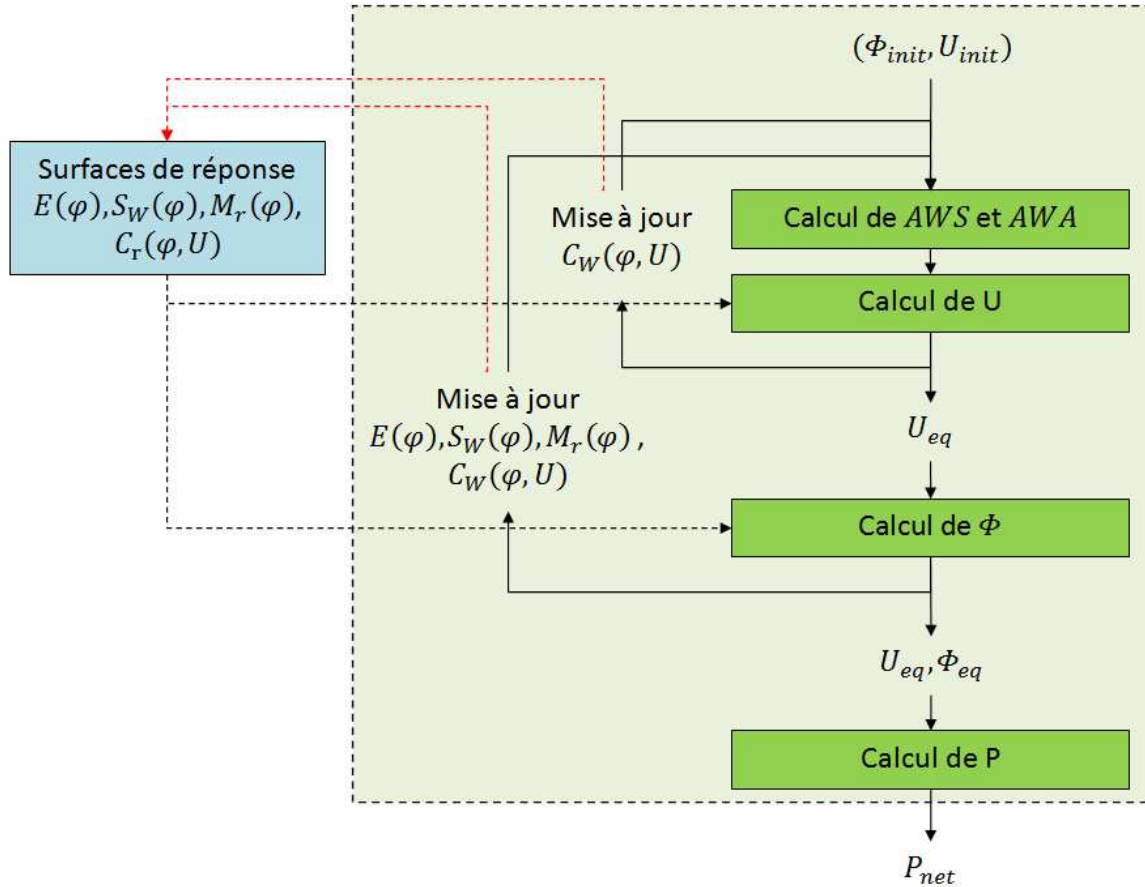


FIGURE II.19 – Schéma du calcul de la puissance nette. On distingue la boucle interne de calcul de la vitesse d'avance U_{eq} et la boucle externe de calcul de l'angle de gîte ϕ_{eq} .

La boucle interne permet donc la résolution de la vitesse d'avance U_{es} définie comme solution de l'équation du mouvement suivant l'axe \vec{x} (II.32). Dans cette équation, les trois forces dépendent de U . La force propulsive F_{prop} dépend du vent apparent (angle et vitesse) qui est lui-même dépendant de la vitesse d'avance (II.33). La résistance des hydrogénérateurs est directement fonction de la vitesse d'avance (II.34). La résistance à l'avancement de la carène R_W est fonction de la vitesse d'avance (II.35). La surface mouillée S_W dépend de l'enfoncement et de l'angle de gîte. Les coefficients C_f et C_r sont fonction de la vitesse d'avance. Les valeurs en rouge dans les équations varient en fonction U .

$$F_{prop} + R_H + R_W = 0 \quad (\text{II.32})$$

avec :

$$F_{prop} = \frac{1}{2} \rho_{air} A_R ((AWS)^2 (C_L \sin TWA) - C_D \cos(AWA)) \quad (\text{II.33})$$

$$R_H = \frac{1}{2} \rho_W S_H U^2 4a(1-a) \quad (\text{II.34})$$

$$R_W = \frac{1}{2} \rho_W S_W U^2 (1+k)(C_f + C_r) \quad (\text{II.35})$$

La boucle externe permet de déterminer l'angle de gîte en régime stationnaire noté ϕ_{eq} . Elle permet ainsi de calculer la vitesse du navire en position d'équilibre $U_{eq}(\phi_{eq})$. A chaque étape de la boucle, les opérations suivantes sont effectuées. On réalise la boucle de calcul de la vitesse d'avance. On met à jour l'angle et la vitesse du vent apparent AWS et AWA . On met à jour l'angle de gîte par résolution de l'équation des moments sur l'axe \vec{x} (II.36).

$$M_r + M_{chav} = 0 \quad (\text{II.36})$$

La puissance produite par les turbines P_H est calculée suivant la formule (II.37) en considérant la vitesse $U_{eq}(\phi_{eq})$. On calcule enfin la puissance produite nette par la formule (II.38).

$$P_H = \frac{1}{2} \rho_W S_H U_{eq}^3 4a(1-a) \quad (\text{II.37})$$

$$P_{net} = \eta P_H - P_{rotors} \quad (\text{II.38})$$

Comme la puissance produite par les turbines est variable alors que la puissance consommée par les rotors est fixe, il arrive que la puissance nette soit négative. Dans ce cas, on considère le navire à l'arrêt et sa puissance produite nulle. Cela revient à considérer les cas de production électrique déficitaires comme non pertinents. De la même manière, dans certains cas d'application une puissance produite maximale est considérée afin de prendre en compte le dimensionnement maximal des équipements du navire.

II.2.4 Choix du point de fonctionnement optimal

Le comportement du navire dépend du réglage des rotors Flettner d'une part et des hydro-générateurs d'autre part. Les rotors Flettner sont contrôlés par le rapport de vitesse k_v alors que les hydrogénérateurs sont ajustés par le facteur d'induction a . Un couple de paramètre (a, k_v) est appelé un point de fonctionnement. On calcule de manière exhaustive la puissance produite pour chaque point de fonctionnement. Le point de fonctionnement obtenant la meilleure puissance est ensuite choisi comme étant le point de fonctionnement optimal.

II.3 Étude de cas

On effectue une étude de cas à l'aide du modèle numérique du voilier hydro-éolien. L'objectif de cette étude est d'une part de montrer un cas d'application du modèle, d'autre part d'évaluer le comportement général d'un voilier hydro-éolien. Le navire étudié et les choix réalisés sont décrits dans la première sous-section. Dans la deuxième sous-section sont développés les résultats de l'étude.

II.3.1 Définition du navire

II.3.1.1 Description générale

On considère un navire de production dont la puissance électrique installée est de 2 MW (cf figure II.20). Le navire est composé des sous-systèmes suivants : carène, système de propulsion éolienne, hydrogénérateurs, électrolyseur, cuves de stockage d'hydrogène. On procède à une description et à un premier dimensionnement estimatif de chaque sous-système. Ce pré-dimensionnement est estimatif car à ce stade de la modélisation, la vitesse d'avance et le point de fonctionnement des sous-système ne sont pas encore définis.

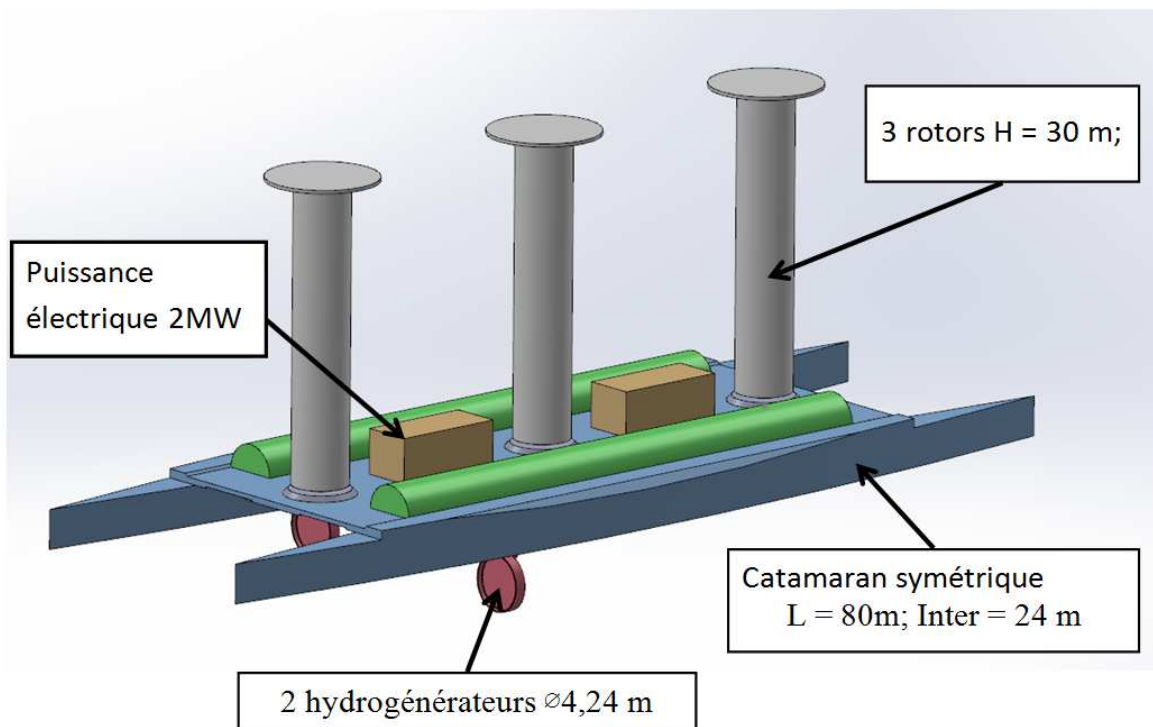


FIGURE II.20 – Principaux paramètres du navire étudié.

Carène Le navire sera de type catamaran. En effet cette forme de carène permet d'obtenir une bonne stabilité à la gîte (grâce à la distance entre les deux coques) et une surface de pont importante (permettant ainsi de placer tous les sous-systèmes du navire). Il est également attendu que la résistance à l'avancement de ce type de carène soit réduite comparé à des carènes monocoques plus larges.

Dimensionnement des hydrogénérateurs On choisit un diamètre d'hydrogénérateur suffisant pour produire la puissance souhaitée. On choisit des hydrogénérateurs dont la surface projetée est de 28,3 m². Cela correspond à une turbine de 6 m de diamètre ou à deux turbines de 4,24 m de diamètre.

Choix du système de propulsion On choisit des rotors Flettner adaptés à la carène. La carène estimée fait 80 m de long et environ 24 m de large. On choisit également une taille de rotor disponible sur le marché. Le rotor choisi est de la dimension des grands rotors de Norsepower (30 m de haut et 5 m de diamètre (73)). Ce rotor présente une envergure et une force propulsive adaptée au navire envisagé. Pour une disposition des rotors en ligne au centre du navire, on doit tenir compte de la distance entre chaque rotor. En supposant que l'on ne peut placer un rotor sur les 15 m à l'arrière et à l'avant du navire (la finesse des carènes à l'avant et à l'arrière semblent insuffisantes pour soutenir le poids d'un rotor), on obtient l'intervalle suivant. Pour 3 rotors de diamètre 5 m, l'intervalle entre chaque rotor est supérieur à 3 fois le diamètre (17,5 m). Cet intervalle permet de limiter les interactions aérodynamiques possibles entre les rotors et de répartir le poids des rotors sur l'ensemble de la carène.

II.3.1.2 Description de la chaîne énergétique

Choix du type de stockage Afin de dimensionner les sous-systèmes du navire, on réalise une évaluation de la chaîne de puissance et de capacité énergétique. Le navire étudié correspond à l'option 2 de l'étude techno-économique réalisée en 2018 (16). Dans cette option, on réalise une électrolyse puis une compression à 350 bars de l'hydrogène produit. Cette méthode de stockage, bien que consommatrice d'énergie lors de la compression, permet de réduire globalement le coût de transport de l'hydrogène (prise en compte de l'intégralité de la chaîne énergétique de production-acheminement-consommation).

Évaluation des puissances nominales Le diagramme II.21 est le schéma de la chaîne de transformation de l'énergie. Les hydrogénérateurs produisent de l'électricité. L'électricité est utilisée pour produire de l'hydrogène par électrolyse et par les autres équipements du navire (rotors Flettner, compresseur, autres équipements). L'hydrogène produit est comprimé. L'hydrogène comprimé est stocké dans des cuves adaptées.

Le navire est dimensionné pour une production électrique des hydrogénérateurs de 2MW. La production électrique nette est de 1,73 MW. La puissance électrique nette est la puissance électrique générée par les hydrogénérateurs tel que définie précédemment II.1.4. Il s'agit de la puissance disponible pour la transformation de l'énergie, c'est-à-dire l'électrolyseur et le compresseur. Selon les données de l'étude (16), l'électrolyse consomme 55 kWh/kg d'hydrogène produit (98). Comme l'hydrogène a une capacité énergétique de 33 kWh/kg, cela correspond à un rendement énergétique de l'électrolyse de 60% (99). La compression à 350 bars consomme 3,1 kWh/kg d'hydrogène comprimé (100). Ainsi, la production nominale d'hydrogène comprimé est de 29,8 kg/h.

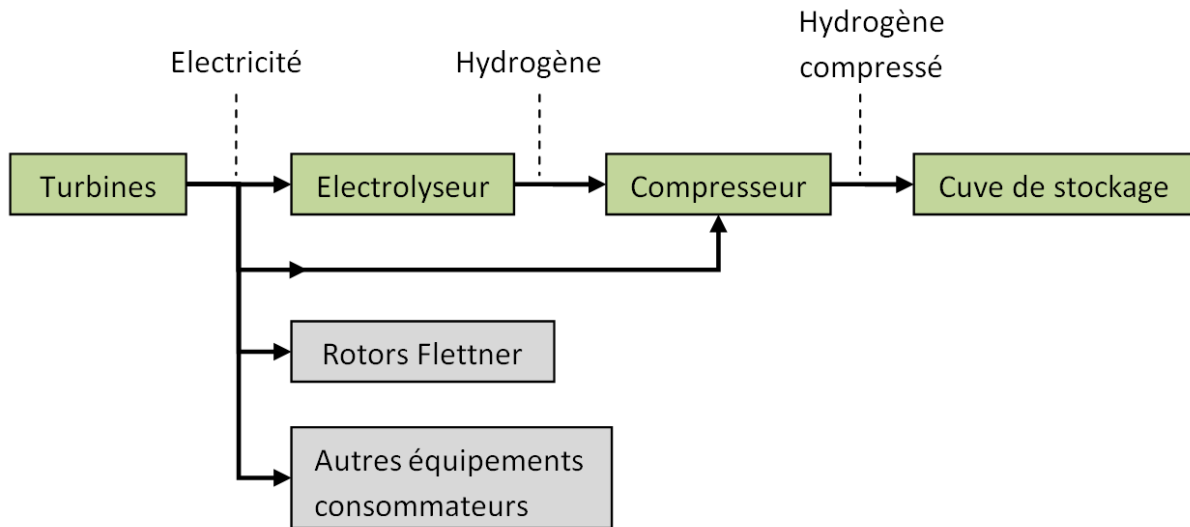


FIGURE II.21 – Schéma de la chaîne de transformation de l'énergie.

Évaluation de la capacité de stockage Selon les études menées sur le routage météorologique menées sur la zone de l'Atlantique Nord (6), le facteur de charge annuel est de 80%. Le facteur de charge est le rapport entre la puissance nominale du navire et sa production effective. Afin d'optimiser la capacité de stockage nécessaire on s'intéresse, dans l'étude de routage, au taux de remplissage par trajet. Dans cette étude, la capacité de stockage du navire correspond à la production nominale (soit pour un navire de 2 MW, 168 MWh). En moyenne le taux de remplissage est autour de 80%. Toutefois, à cause des fortes variations saisonnières de la production, le taux de remplissage atteint régulièrement 100% lors des mois venteux (exemple janvier, février). Ainsi, une réduction de la capacité de stockage du navire baissera significativement le facteur de charge annuel. On sélectionne donc une capacité de stockage correspondant à la production nominale pendant 7 jours. La production nominale nette électrique de 7 jours est 336 MWh. La capacité de stockage d'hydrogène doit être de 5000 kg.

II.3.1.3 Évaluation de la masse du navire

On réalise le devis de poids du navire. Il est décrit dans le tableau II.6. Dans ce tableau sont récapitulés les dimensionnements choisis pour chacun des sous-système impliqués dans la chaîne énergétique tels qu'évalués dans les sous-sections précédentes.

Équipement	Dimensionnement	Masse relative	Masse appliquée
Rotors Flettner	3 rotors	49 t/rotor (73)	147 t
Hydrogénérateurs	1,73 MW	11,4 t/MW (101)	20,2 t
Electrolyseur	1,73 MW ; 29,8 kg/h	30,0 t/MW (102)	51,9 t
Compresseur	29,8 kg/h		
Hydrogène stocké	5,0 t	-	5,0 t
Cuves de stockage	capacité 5,0 t	20,83 t/t(H ₂) (12; 100)	104,2 t
Autres équipements	-	-	50,0 t
Coque et pont	20% de la masse embarquée		75,7 t

TABLE II.6 – Inventaire des équipements du navire de production et de leur masse respective.

On remarque que la masse de l'hydrogène produit est largement inférieure à la masse de la cuve de stockage. En effet, d'une part l'hydrogène possède une excellente capacité énergétique massique, d'autre part le stockage à haute pression nécessite une cuve résistante et par conséquent de masse élevée. La faible masse de l'hydrogène produit par rapport à la masse totale du navire permet de dire que le navire aura des performances quasi indépendantes de la quantité d'hydrogène stockée, et donc régulières le long de son parcours de production. L'augmentation de la durée de production (ici fixée à 7 jours), aura en revanche une forte influence sur la masse et donc les performances du navire (par exemple, proposer un navire capable de réaliser des parcours de production de 14 jours au lieu de 7 équivaut à augmenter la masse des cuves de stockage et dont la masse totale du navire de 22%).

On applique 50 tonnes supplémentaires pour les autres équipements. Cela comprend tout ce qui n'est pas indiqué dans cette évaluation (moteur auxiliaire, équipement de vie ou de sécurité, etc...). Le poids de la coque est estimée à 20% de la masse des équipements embarqués ce qui est une valeur élevée pour un navire de transport hors transport de passagers (103). La masse totale du navire (c'est-à-dire son déplacement) est ainsi estimée à 460 t.

II.3.1.4 Choix de la carène

On sélectionne une carène correspondant au déplacement de 460 t souhaité. La carène sera de type catamaran symétrique. On suppose que chaque carène doit pouvoir supporter le poids du navire même en cas de gîte importante (cas extrême où une seule coque est dans l'eau). Chaque coque doit donc avoir un volume déplacé admissible de 460 t. Les coques sont définies à l'aide de la fonction de forme de wigley parabolique. On sélectionne, parmi plusieurs coques de forme semblable celle qui, a priori, présentera les meilleurs résultats. Le choix est basé sur la valeur de résistance à l'avancement sur la plage de vitesse attendue (5,0 à 15,0 m/s). Les carènes étudiées sont des carènes semblables, sous certains aspects, à la carène utilisée pour la validation II.1.3.3 II.16. Leurs paramètres sont inscrits dans la table II.7.

-	Carène de validation	C01	C02	C03	C04	C05
$L(m)$	6,0	54,09	80,00	40,00	80,00	80,00
$B(m)$	0,60	5,41	4,45	6,29	6,67	2,97
$D(m)$	0,38	3,43	2,82	3,99	1,88	4,23
$Inter(m)$	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0
m (tonnes)	0,628	460	460	460	460	460

TABLE II.7 – Paramètres de forme des 5 carènes testées et de la carènes de validation.

Le graphique II.22 montre le tracé de la résistance à l'avancement de ces carènes en fonction de leur vitesse. La surface mouillée de ces carènes étant variable, on observe des différences significatives de résistance à l'avancement. En effet la surface mouillée est un des paramètres de l'équation de la résistance à l'avancement (voir équation (II.23)). Les carènes C02 et C04 présentent les meilleurs résultats. La carène C04 est toutefois légèrement meilleure que la carène C02. La carène C04 est ainsi sélectionnée pour l'étude.

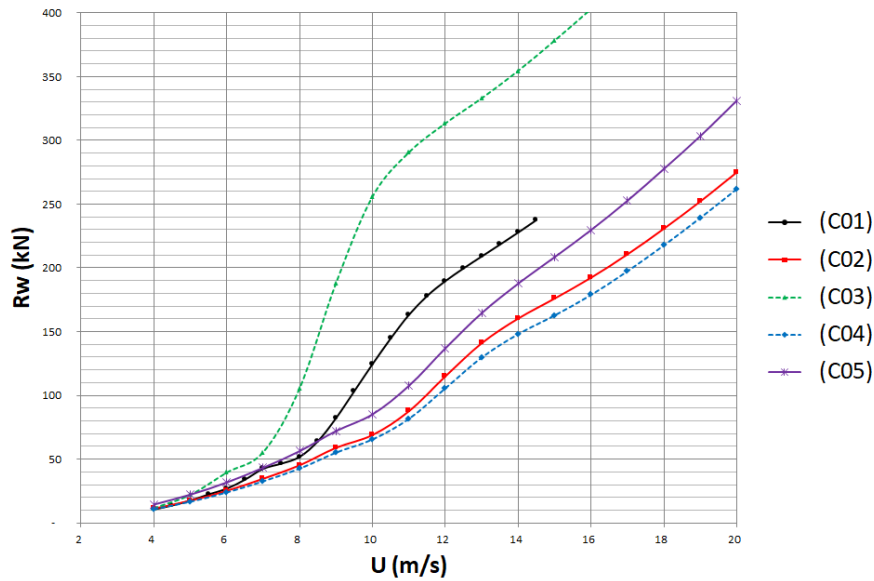


FIGURE II.22 – Résistance à l’avancement totale en fonction de la vitesse d’avance de différentes carènes.

II.3.1.5 Résumé du navire

Les paramètres principaux du navire sont résumés dans le tableau II.8.

Élément	Caractéristiques remarquables
Carène	Catamaran symétrique, longueur 80 m, écartement 24 m
Déplacement total	460 t
Propulsion	3 rotors Flettner (diamètre 5 m, hauteur 30 m)
Hydrogénérateurs	2 turbines de diamètre 4,25 m
Production électrique	1,73 MW électrique net
Production d’hydrogène	29,8 kg/h
Capacité de stockage d’hydrogène	5,0 t

TABLE II.8 – Récapitulatif des éléments principaux du navire

II.3.2 Résultats

II.3.2.1 Courbes polaires de puissance et de vitesse

La puissance produite ainsi que la vitesse d'avance sont présentées sous forme de courbes polaires (voir figures II.24 et II.25). L'angle indiqué correspond à l'angle du vent réel par rapport à la direction d'avance du navire (TWA). Le rayon indiqué correspond à la valeur étudiée (exemple puissance nette produite). Il y a sur chaque graphique plusieurs courbes de couleurs différentes correspondant à une vitesse de vent réel TWS de 6 à 14 m/s.

La figure II.23 propose une grille de lecture des courbes polaires. On y retrouve suivant le secteur de la courbe, les différentes allures, c'est-à-dire les différentes direction du vent par rapport au navire (secteur rouge pour le navire face au vent, secteur vert pour le navire vent de travers et secteur orange pour le navire vent arrière). La partie haute de la courbe polaire (TWA compris entre 0 et 90°) correspond au navire contre le vent alors que la partie basse (TWA compris entre 90° et 180°) correspond au navire dans le sens du vent (allures portantes). Chaque côté de la courbe correspond à une amure du navire (c'est-à-dire à gauche du graphique navire tribord amure donc vent venant de la droite, à droite du graphique navire bâbord amure donc vent venant de la gauche).

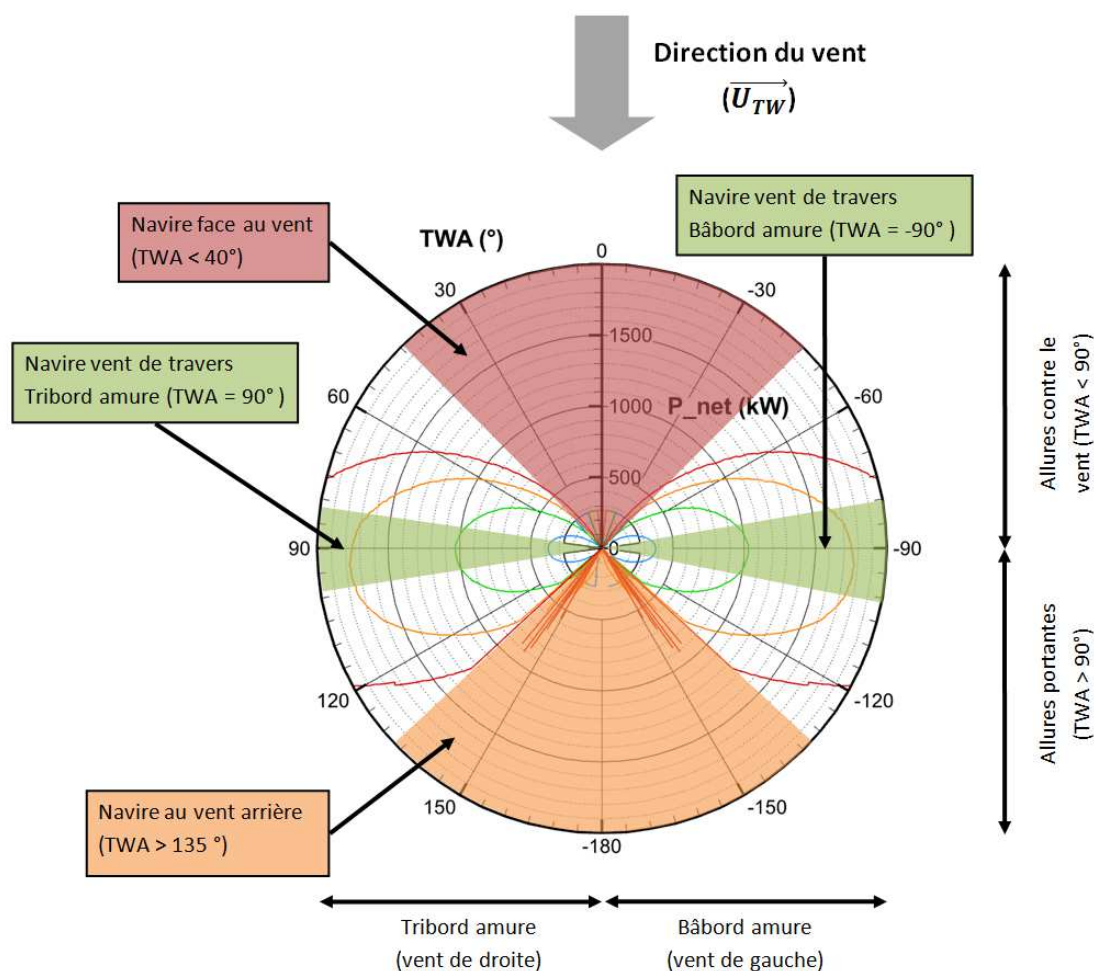


FIGURE II.23 – Schéma de lecture des courbes polaires.

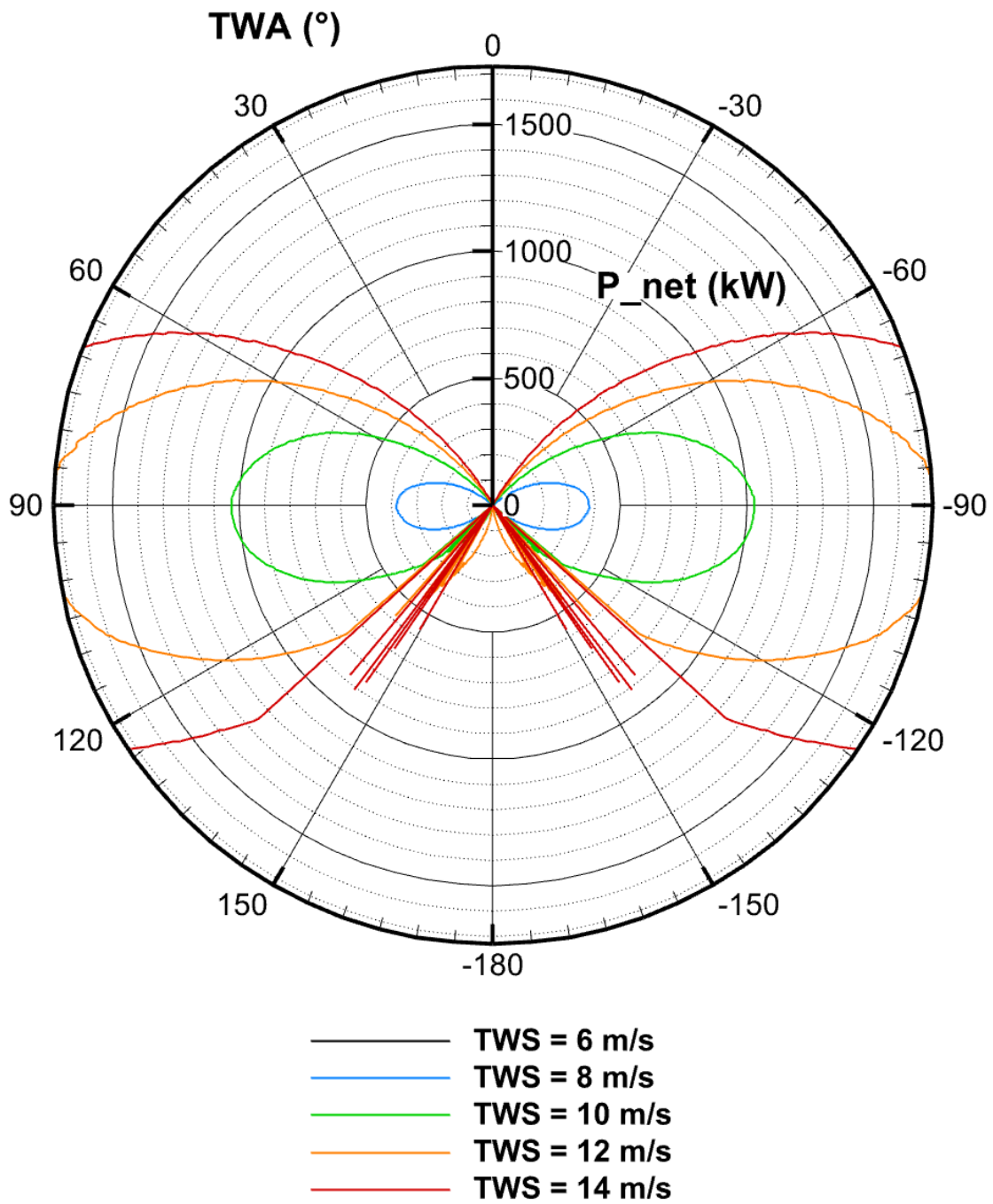


FIGURE II.24 – Courbe polaire de la puissance électrique nette P_{net} en fonction de l'angle TWA et de la vitesse TWS du vent réel.

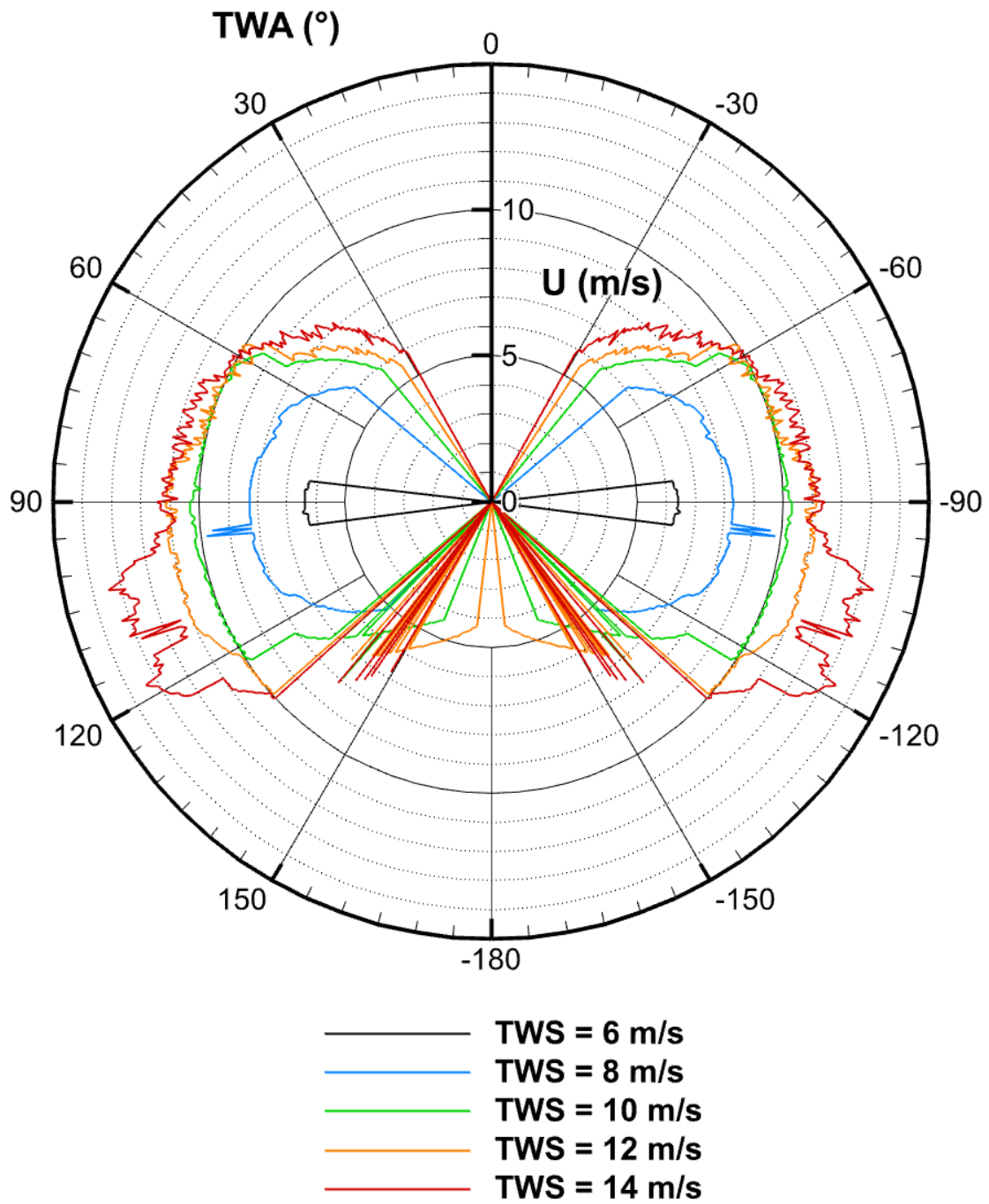


FIGURE II.25 – Courbe polaire de la vitesse d'avance U en fonction de l'angle TWA et de la vitesse TWS du vent réel.

Puissance produite Sur la courbe polaire de la puissance nette [II.24](#) on distingue plusieurs zones d'angle de vent correspondant aux plages de fonctionnement du navire. La délimitation précise de chaque zone dépend de la vitesse du vent. Il y a, pour chaque bord (c.a.d pour les angles négatifs et pour les angles positifs), deux plages de non-fonctionnement et une plage de fonctionnement. Les deux plages de non-fonctionnement sont pour les zones d'angles faibles (navire presque face au vent) et les zones d'angles élevés (navire presque vent arrière). Cela s'explique par l'orientation de la résultante aérodynamique des rotors Flettner. Cette résultante est quasi-perpendiculaire au vent (voir le schéma de projections de la traînée et de la portance [II.7](#)). Ainsi, lorsque le navire est face ou vent arrière, l'orientation de la résultante aérodynamique des rotors ne permet pas une propulsion efficace.

La plage de fonctionnement correspond aux angles de vent de travers (c.a.d proches de 90° ou de -90°). Cela correspond à la meilleure orientation de la résultante aérodynamique des rotors. On remarque que l'angle optimal n'est pas précisément vent de travers mais tend à augmenter avec la vitesse du vent ($90,7^\circ$ pour $TWS = 8$ m/s (courbe bleue) et $93,5^\circ$ pour $TWS = 12$ m/s (courbe orange)). Plusieurs facteurs peuvent expliquer ce décalage. Premièrement l'orientation de la résultante aérodynamique n'est pas exactement perpendiculaire au vent mais d'un angle plus ouvert à cause de la traînée. D'autre part l'angle et la vitesse du vent apparent est différent de l'angle du vent réel.

La puissance produite sur la plage de fonctionnement varie grandement en fonction de la vitesse du vent. Sur cette étude, le dimensionnement du navire induit un plafonnement à 1.73 MW (puissance nominale). Pour une vitesse de vent inférieure à 10 m/s, la puissance produite est faible (moins de 500 kW avec $TWS = 8$ m/s et pas de production à $TWS = 6$ m/s). Pour $TWS = 10$ m/s, la puissance produite atteint 1 MW sur une plage réduite d'angle de vent (de $85,0^\circ$ à $98,0^\circ$). Pour $TWS = 12$ m/s cette plage est étendue (de $61,0^\circ$ à $125,5^\circ$) et la puissance nominale est atteinte de $86,0^\circ$ à $101,5^\circ$. Enfin, pour $TWS = 14$ m/s, la puissance nominale est atteinte sur une plage plus étendue (de $69,0^\circ$ à $123,5^\circ$). Le tableau [II.9](#) résume ce résultat. Pour chaque vitesse de vent est indiquée la puissance maximale produite, et la plage angulaire où la production est d'au moins 50% du maximum. Pour les vitesse de vent 12 et 14 m/s, la puissance maximum correspond à la puissance nominale.

TWS	P_{max}	Plage angulaire de bon fonctionnement
6 m/s	7 kW	$85,8^\circ$ à $96,0^\circ$
8 m/s	379 kW	$64,0^\circ$ à $117,5^\circ$
10 m/s	1030 kW	$59,5^\circ$ à $122,5^\circ$
12 m/s	1730 kW (puissance nominale)	$57,5^\circ$ à $129,0^\circ$
14 m/s	1730 kW (puissance nominale)	$50,0^\circ$ à $132,5^\circ$

TABLE II.9 – Puissance maximale produite et plage angulaire de bon fonctionnement (c'est-à-dire dont la puissance produite est d'au moins 50% de la puissance nominale).

On trace également la courbe de la puissance produite en fonction du vent [II.26](#). Cette courbe est réalisée en considérant le navire travers au vent ($TWA = 90$). Cette courbe permet d'identifier la vitesse de vent minimum pour la production d'énergie (6 m/s) et la vitesse de vent pour laquelle la production nominale est atteinte (12 m/s). Entre ces deux valeurs, la production électrique des hydrogénérateurs varie en fonction de la vitesse du vent.

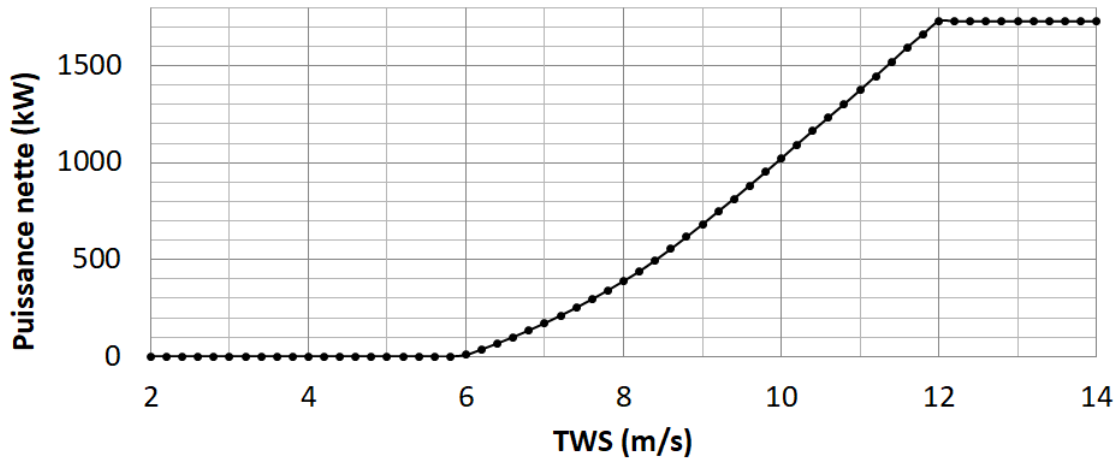


FIGURE II.26 – Puissance produite P_{net} au vent de travers ($TWA = 90^\circ$) en fonction de la vitesse du vent (TWS).

Vitesse du navire La vitesse du navire est un facteur clé qui permet de comprendre son fonctionnement. Le graphique II.25 montre la courbe polaire de la vitesse d’avance du navire.

Cette courbe suit globalement l’évolution de la puissance produite développée dans le paragraphe précédent. La vitesse du navire est généralement comprise entre 7 et 14 m/s. Il est intéressant de noter que la vitesse d’avance est sensiblement équivalente à la vitesse du vent réel, tout en restant inférieure au vent perçu par le navire (c’est-à-dire le vent apparent). Par exemple à la vitesse de vent réel 10 m/s et à l’angle 90° , la vitesse d’avance du navire est de 9,96 m/s (très proche de la vitesse du vent réel), mais la vitesse du vent apparent s’élève déjà à 14,1 m/s.

On remarque également que les courbes de vitesses ont des variations plus brusques que les courbes de puissance. En effet, le choix d’un couple de fonctionnement [rapport de vitesse ; facteur d’induction] est réalisé suivant le critère de la puissance produite. Il peut y avoir plusieurs couples possibles avec des puissances produites proches mais des vitesses d’avances différentes. Le changement brusque de vitesse d’avance sans modification de la puissance produite indique que le calcul a sélectionné un autre couple de fonctionnement. Le facteur d’induction de l’hydrogénérateur présente également ces variations brusques. L’ajout d’un second critère de choix (par exemple la vitesse d’avance) ou d’une autre méthode de choix du couple de fonctionnement pourrait éviter ces variations de la vitesse d’avance.

II.3.2.2 Équilibre des forces

On étudie l'équilibre des forces afin d'estimer l'importance de la traînée de la carène (traînée perdue) par rapport à la traînée des hydrogénérateurs (traînée utile). Le rapport de force est défini comme le rapport entre la force de traînée des hydrogénérateurs sur la traînée totale. A partir des courbes polaires, on réalise une étude statistique de l'ensemble des valeurs calculées. La répartition statistique est représentée sur le graphique II.27. Outre les valeurs nulles, le rapport de force est toujours compris entre 0,6 et 0,9. Avec un vent plus élevé (répartitions pour un vent de 12 et 14 m/s), le rapport de force est plus élevé avec une majorité de valeurs comprises entre 0,7 et 0,9. Cette répartition montre que la majorité de la traînée est effectivement utilisée pour la production d'énergie et que les pertes (traînées non utiles) sont comparativement plus faibles.

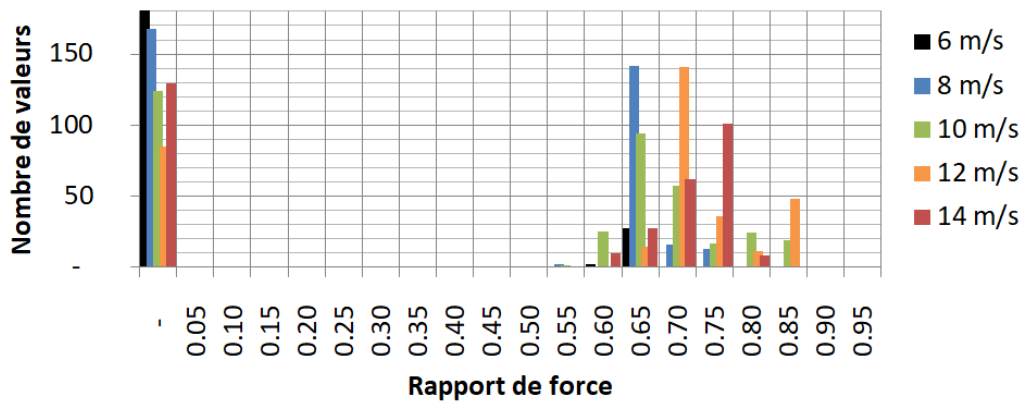


FIGURE II.27 – Répartition statistique de l'ensemble des rapports de force (traînée des hydrogénérateurs / traînée totale) issus des courbes polaires. Chaque courbe compte un total de 360 points.

II.3.2.3 Conclusion de l'étude de cas

Les performances du navire à l'angle de vent 90° (c'est-à-dire navire vent de travers) et pour plusieurs vitesses de vent sont résumées dans le tableau II.10. Chaque colonne correspond à une vitesse de vent réel de 8,0 à 14 m/s. L'angle de vent 90° a été sélectionné car c'est l'angle de vent privilégié pour un trajet aller-retour dans un vent régulier (6). Il est ainsi représentatif des performances moyennes du navire.

Le navire de production atteint la puissance nominale de 1,73 MW à partir d'un vent de vitesse 12 m/s. La puissance produite à 10 m/s est de 1,0 MW. Sa vitesse d'avance est proche de la vitesse du vent réel (de 8 à 12 m/s). Il est à noter que grâce à son déplacement, le vent perçu (le vent apparent) est plus rapide d'environ 4 m/s par rapport au vent réel (exemple vent apparent de 14,1 m/s dans un vent réel de 10,0 m/s). Cela contribue aux bonnes performances du navire. La majorité de la traînée totale du navire est utile pour la production d'énergie (67% à 76% de la traînée totale est générée par les hydrogénérateurs). Enfin, le navire en fonctionnement présente un angle de gîte faible signe de sa bonne stabilité. Cela est particulièrement vrai à l'angle de vent 90° . En effet à cet angle les rotors Flettner produisent une force de dérive (et donc un couple de chavirement) faible par rapport à la force propulsive. De plus la variation de la vitesse de rotation des rotors permet d'ajuster efficacement la résultante aérodynamique (diminution du rapport de vitesse de 3,5 à 2,6 en fonction de la vitesse du vent).

On remarque des valeurs faibles du facteur d'induction et ce pour toutes les configurations étudiées (de 0,026 à 0,042). En effet, dans le cas d'un hydrogénérateur fixé sur un navire, le choix du facteur d'induction a une influence sur la résistance à l'avancement de l'hydrogénérateur et donc sur la vitesse calculée à l'équilibre quasi-statique. Ainsi des valeurs faibles du facteur d'induction permettent d'obtenir des vitesses d'avances plus élevées, ce qui a un impact positif sur la puissance produite.

Paramètre	Valeur				Unité
Vitesse du vent réel	8,0	10,0	12,0	14,0	m/s
Vitesse du vent apparent	11,5	14,1	16,35	18,07	m/s
Vitesse d'avance	8,3	10,0	11,1	11,43	m/s
Angle de gîte	0,2	0,3	0,3	0,3	deg
Facteur d'induction	0,026	0,030	0,034	0,042	-
Rapport de vitesse rotors	3,5	3,3	2,86	2,6	-
Force propulsive	150	234	321	399	kN
Rapport de force	67	72	73	76	%
Puissance nette	0,39	1,02	1,73	1,73	MW

TABLE II.10 – Performances du navire à l'angle 90° pour différentes vitesses de vent réel (de 8 à 14 m/s).

Chapitre III

Optimisation de la forme de carène

On souhaite développer l'analyse comparative du voilier hydro-éolien en s'appuyant sur les méthodes numériques d'optimisation. Ces méthodes d'optimisation sont parfois employées sur des concepts peu matures avant de réaliser un design plus détaillé du système (104). On se place dans ce cadre de modèle basse fidélité (typiquement les modèles quasi-statiques) et dont l'intérêt est de préciser des éléments clés du design. Ces optimisations sont caractérisées par une évaluation rapide afin de tester un grand nombre de cas (plusieurs centaines voir milliers de designs).

Des optimisations de forme de carène ont déjà été réalisées (96; 105; 106; 107). Les objectifs de ces optimisations sont les propriétés hydrodynamiques du navire dont la vitesse d'avance (sous différentes conditions) et d'autres éléments comme par exemple la stabilité du navire (108). Pour les systèmes de production d'énergie comme les éoliennes, des optimisations ont été réalisées avec pour objectifs les propriétés de production des systèmes (puissance produite, stabilité de la production, autres paramètres de l'électricité produite) (109).

Dans l'étude présentée ici on se situe à la frontière entre ces deux domaines. D'une part l'optimisation porte sur la forme de carène. Les données d'entrée et la manière de décrire la carène seront donc très proches de certaines études réalisées (110). D'autre part l'objectif de l'optimisation est la puissance produite par le navire. Afin de ne pas complexifier le cas étudié, l'objectif unique sélectionné est la puissance électrique nette du navire (c'est-à-dire l'électricité produite par l'hydrogénérateur). D'autres éléments sont cependant à prendre en compte dans l'étude de la capacité de production comme par exemple le maintien de cette capacité pour des angles et des vitesses de vent variées. Ces éléments seront discutés dans l'analyse des résultats.

La méthode d'optimisation et son implémentation sont décrits dans la première section de ce chapitre. La deuxième section présente une étude de cas de deux optimisations réalisées : une optimisation sur des carènes de catamaran dites libres (carènes de type catamarans symétriques et asymétriques) et une optimisation sur des carènes de catamarans symétriques uniquement.

III.1 Méthodes et implémentation

III.1.1 Algorithme d'optimisation

De nombreux algorithmes et méthodes sont disponibles pour réaliser une optimisation (106; 107; 111; 112). Le choix du type d'algorithme pour la résolution du problème est soumis aux considérations suivantes. Tout d'abord, le lien entre les paramètres et le résultat obtenu (c'est-à-dire l'évaluation de la puissance produite) n'est pas évident. Cette fonction est difficilement calculable ce qui exclut une résolution mathématique directe. Comme on ne connaît pas la forme de la réponse (puissance produite en fonction des paramètres), il peut exister plusieurs minimums locaux. On doit donc choisir un algorithme qui ne converge pas vers un minimum local. Enfin on souhaite une résolution rapide car le temps d'évaluation de chaque design est élevé (environ 30 mn par évaluation). On souhaite donc pouvoir explorer simultanément plusieurs combinaisons de paramètres. Les algorithmes génétiques répondent à ces contraintes (113; 114) : ils ne convergent pas vers les minimums locaux, ne dépendent pas de la complexité de la fonction objectif et sont adaptés aux problèmes avec un grand nombre de paramètres. En outre, comme les algorithmes génétiques peuvent résoudre des problèmes multi-objectifs il sera possible par la suite d'ajouter à la fois des paramètres et des objectifs.

Parmi les algorithmes génétiques les NSGA II et NSGA III (Non-Sorting Genetic Algorithm) obtiennent de bonnes performances et sont couramment utilisés (115; 116). Le NSGA III est plus performant que le NSGA II pour les problèmes de grands hyper-volumes (problèmes avec plus de 2 objectifs) (117). Comme l'optimisation présentée ici ne porte que sur un objectif, on sélectionne alors l'algorithme NSGA II.

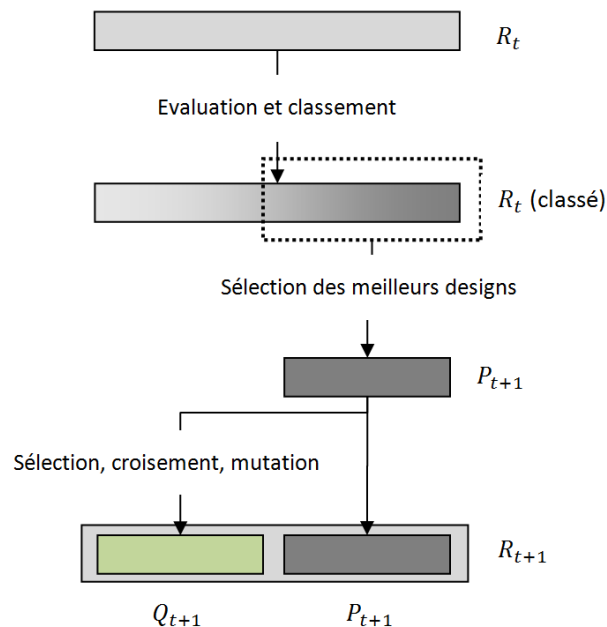


FIGURE III.1 – Principe de création de la population R_{t+1} à partir de la population R_t (115).

La spécificité de l'algorithme choisi réside dans ses opérateurs de mutation et de croisement. L'opérateur de mutation permet d'introduire régulièrement des valeurs aléatoires pour les paramètres. L'opérateur de croisement permet de tester des combinaisons différentes des paramètres (on mélange les valeurs de paramètres portés par plusieurs designs). Ce sont ces deux opérateurs qui permettent d'éviter la convergence vers un minimum local. Le principe de fonctionnement de l'algorithme, indiqué sur la figure III.1, est le suivant :

- On évalue tous les designs d'une génération (population R_t) ;
- On classe cette population suivant le ou les objectif(s) de l'optimisation. Les designs qui obtiennent les meilleurs résultats sont retenus pour la population suivante et forment P_{t+1} ;
- La population P_{t+1} est alors soumise aux opérateurs de sélection, de croisement et de mutation pour former la population ; Q_{t+1} . Le principe de ces opérateurs est de générer des variantes des designs de la population P_t en croisant leurs paramètres. L'opérateur de mutation permet également d'introduire de nouvelles valeurs aléatoires des paramètres. Cela permet d'éviter la convergence de l'algorithme vers un minimum local.
- La nouvelle population R_{t+1} est enfin formée par P_{t+1} et Q_{t+1} .

Ce fonctionnement est valable pour toutes les générations sauf la première génération qui est générée de manière aléatoire (on choisit pour chaque design de cette génération une valeur aléatoire pour chaque paramètre).

Paramétrisation de l'algorithme Pour un algorithme NSGA II plusieurs paramètres doivent être sélectionnés : nombre d'individu par génération, nombre de générations (durée totale de l'optimisation), probabilité de croisement, probabilité de mutation. Les paramètres d'algorithme optimaux dépendent du problème posé. Des méthodes sont proposées pour choisir les meilleurs paramètres pour un problème (118). Elle peuvent toutefois être gourmandes en temps de calcul, chaque évaluation d'un paramètre demandant de réaliser plusieurs fois l'optimisation. La bonne convergence du résultat peut cependant être identifiée en fin d'optimisation et des valeurs usuelles de la probabilité de mutation et de croisement permettent d'éviter les minimums locaux (115). On choisit donc les paramètres sans réaliser d'optimisation des paramètres. Les paramètres sélectionnés sont : probabilité de croisement de 0,9 et probabilité de mutation de 0,5. "L'élitisme" disponible pour l'algorithme NSGA II (fait que les meilleurs résultats depuis le début de l'optimisation soient toujours transmis aux générations suivantes) permet de renforcer les caractéristiques souhaitées (113). Le nombre d'individu par génération doit dépendre du nombre de paramètres. On choisit 4 individus par génération et par paramètre. Le tableau III.1 résume les paramètres sélectionnés.

Paramètre	Valeur
Algorithme	NSGA II
Type de NSGA II	Élitisme contrôlé
Population initiale	Aléatoire (4 fois le nombre de paramètres)
Probabilité de croisement	90%
Probabilité de mutation	50%

TABLE III.1 – Paramètres de l'algorithme d'optimisation

III.1.2 Évolution du modèle pour l'optimisation

Les designs sont évalués et classés en fonction de la puissance nette produite. Cette puissance n'est calculée que dans une condition de vent sélectionnée (c'est-à-dire un angle et une vitesse de vent). Ce calcul suit la procédure décrite dans le chapitre II. L'implémentation du calcul est toutefois différente que celle d'un cas unique. D'une part la procédure est automatisée, d'autre part son temps d'exécution est réduit.

Afin de réduire le temps d'exécution, le programme de calcul est porté sous Fortran. Ce langage dit "interprété" permet une bonne rapidité d'exécution. La gestion de l'algorithme d'optimisation et l'appel des sous-programmes est gérée par le logiciel dédié ModeFrontier. Le calcul est décomposé en trois blocs ce qui permet un séquençement : génération du maillage et création des surfaces de réponse de stabilité (réalisée par "Mesh"), création de la surface de réponse de la résistance à l'avancement de la carène (réalisée par "REVA"), évaluation de la puissance nette produite (réalisée par "VPP" pour "Velocity Prediction Program"). La figure III.2 rappelle le fonctionnement du calcul et montre à droite l'implémentation réalisée.

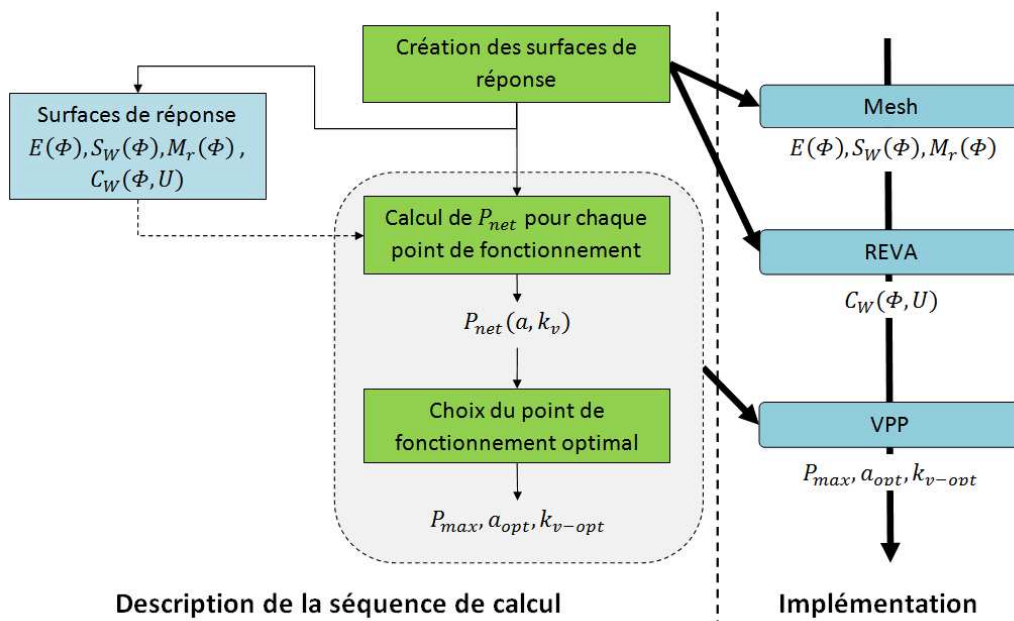


FIGURE III.2 – logique du calcul de la puissance nette (à gauche) et implémentation réalisée pour l'optimisation (à droite).

Une détection de l'erreur de la procédure est mise en place. Si l'un des sous-programmes n'a pas abouti, le cas est considéré comme faux. Cette détection est nécessaire par exemple dans le cas où la carène générée par Mesh ne correspond pas à ce qui est attendu par Reva (nombre de coques immergées incorrect, forme non compatible).

III.1.3 Paramètres à optimiser

On réalise deux configurations de l'optimisation. La première optimisation, dite en "configuration symétrique", porte sur l'optimisation de catamarans symétriques uniquement. La deuxième optimisation dite en "configuration libre" porte sur l'optimisation de catamarans sans contrainte particulière (carènes symétriques ou non-symétriques). Elle est réalisée pour tester si des formes de catamarans non symétriques (tels des praos¹) sont intéressantes (voir exemple de ce type de carène figure III.4). Seul le nombre de paramètres et le nombre d'individus par génération distinguent ces deux configurations.

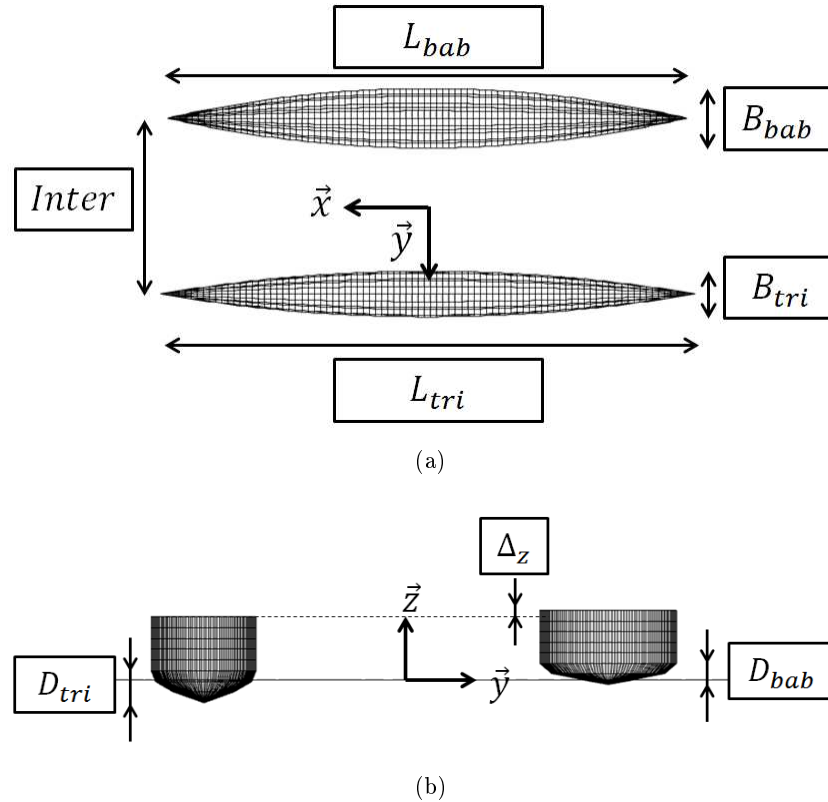


FIGURE III.3 – Schéma de la carène à optimiser et des paramètres qui la définissent. a) Vue de dessus. b) Vue de face.

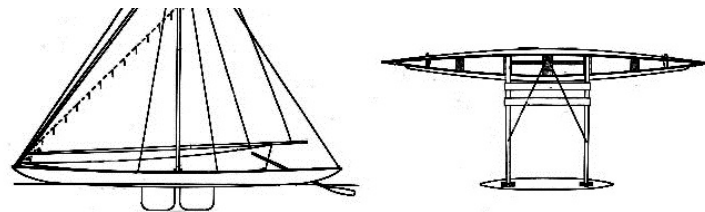


FIGURE III.4 – Exemple de carène fortement asymétrique de type prao (119).

1. Un prao est un type de voilier multicoque indonésien dérivé des pirogues à balancier. Il est caractérisé par sa construction asymétrique. Le navire est composé d'une coque principale sur laquelle est fixée la voile et d'un flotteur généralement plus petit mais qui peut être de même longueur.

En configuration libre tous les paramètres sont utilisés pour décrire la carène. Ils sont au nombre de 8 et sont identifiés sur la figure III.3 et dans le tableau III.2. En configuration symétrique, les deux coques du navires doivent être identiques. Par conséquent les paramètres utilisés pour décrire la coque tribord sont identiques aux paramètres utilisés pour la coque bâbord. Les conditions appliquées sur les paramètres sont les suivantes :

$$\begin{cases} L_{tri} = L_{bab} \\ B_{tri} = B_{bab} \\ D_{tri} = D_{bab} \\ \Delta_z = 0 \end{cases}$$

Cela revient ainsi à considérer l'optimisation de 4 paramètres seulement. Le tableau III.2 résume le nombre de paramètres et leurs détails pour chacune des deux configurations.

-	Configuration symétrique	Configuration libre
Carènes étudiées	Catamarans symétriques uniquement	Pas de contrainte
Nombre de paramètres	4 paramètres	8 paramètres
Paramètres	$L, B, D,$ $Inter$	$L_{tri}, B_{tri}, D_{tri},$ $L_{bab}, B_{bab}, D_{bab},$ $Inter, \Delta_z$

TABLE III.2 – Détail des configurations d'optimisation symétrique et libre

III.1.4 Spécificités des carènes non-symétriques

Représentation physique des carènes Au sein du modèle, seule la partie immergée du maillage de la carène a une influence sur la simulation. La partie immergée est légèrement variable entre la position au repos (c'est-à-dire à l'angle $\phi = 0$ et à l'enfoncement initial) et en fonctionnement (c'est-à-dire à l'angle de gîte et à l'enfoncement à la position d'équilibre calculée). Le maillage de la carène n'est utilisé que pour calculer des valeurs liées au fluide (surface mouillée, résistance à l'avancement, moment de redressement). La masse du navire est choisie indépendamment du maillage.

Ainsi, bien que la carène soit intégralement représentée par le maillage (image du haut sur la figure III.5), seule une partie est prise en compte dans le calcul (image du bas sur la figure III.5). Ce point est important car il permet de mieux comprendre la représentation de certaines carènes non-symétriques. En effet, bien que le volume complet des deux coques puisse être de même grandeur, le volume immergé peut être variable. On définit alors le rapport de volume immergé R_V qui est défini de la manière suivante :

$$R_V = \frac{V_{i,tri}}{V_i}$$

Avec $V_{i,tri}$ le volume immergé de la coque tribord et V_i le volume immergé total de la carène. Ce rapport est toujours défini à un angle de gîte nul (position de repos). On note les trois valeurs remarquables de ce rapport : $R_V = 0$ la carène est monocoque (coque bâbord uniquement), $R_V = 0,5$ la carène est symétrique, $R_V = 1$ la carène est monocoque (coque tribord uniquement). Toutes les autres valeurs correspondent à des carènes catamarans non-symétriques.

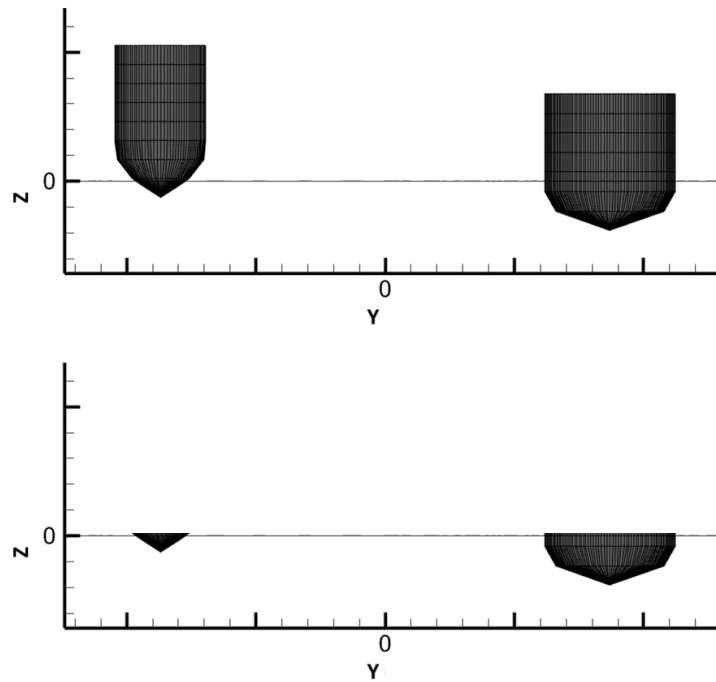


FIGURE III.5 – En haut : maillage complet réalisé ; En bas : partie du maillage utilisée pour le calcul.

Position du centre de gravité Pour toutes les carènes on souhaite représenter une position du centre de gravité G qui soit physiquement réaliste. On choisit l'hypothèse suivante qui permettra indirectement de placer le centre de gravité : l'angle de gîte $\phi = 0$ est la position de repos de la carène. Pour satisfaire cet équilibre le centre de gravité est placé au dessus du centre de carène. Cela correspond donc pour les cas suivant à : lorsque $R_V = 0,5$, G est au centre du navire (carène symétrique) ; Lorsque $R_V = 0$, G est au dessus de la carène bâbord ; Lorsque $R_V = 1$, G est au dessus de la carène tribord. Pour les autres cas, G sera positionné entre le centre du navire et la coque dont le volume immergé est le plus important. La figure III.6 schématise une carène avec une coque de volume plus important (coque de droite) et dont le centre de gravité est déporté. On représente ainsi le fait qu'une plus grande partie de la masse est supporté par une carène de volume plus important (plus d'équipements installés, masse de la coque plus importante).

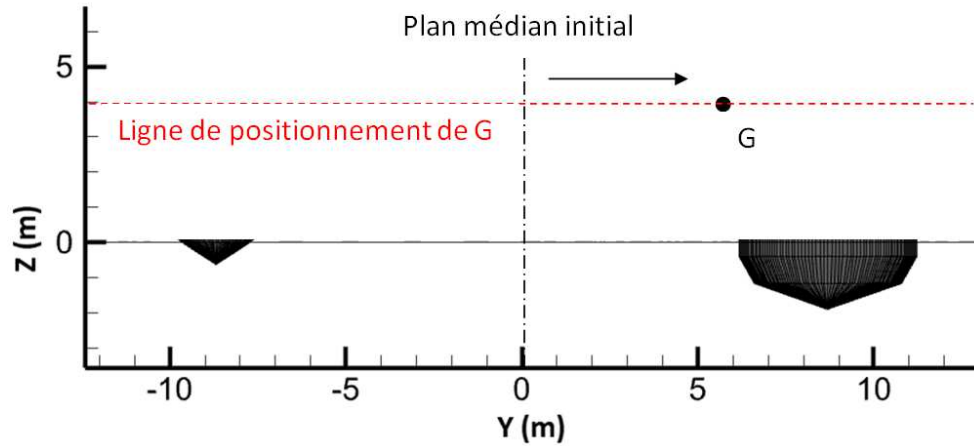


FIGURE III.6 – Placement du centre de gravité en fonction de la répartition des volumes immergés.

III.1.5 Gestion des contraintes

Les contraintes sont prises en compte de manière logique : un individu respecte ou ne respecte pas l'ensemble des contraintes. Un résultat dont les contraintes ne sont pas respectées se voit attribuer une puissance produite nulle et ne sera pas retenu pour les générations suivantes. Les contraintes mises en place peuvent être par exemple : des contraintes de stabilité (angle de gîte maximum, obligation de maintenir les deux coques immergées, etc...), des contraintes de design (rapport de volume entre les deux coques par exemple). La liste des contraintes applicables est donnée dans le tableau III.3

Description de la contrainte	Type de contrainte	Moment d'application
Paramètres de la carène	Bornage des paramètres	Avant l'évaluation
Angle de gîte minimum/maximum	Contrainte logique	Après l'évaluation
Nombre de coques immergées	Contrainte logique	Après l'évaluation
Volumes respectifs des coques	Contrainte logique	Après l'évaluation
Réussite du calcul	Contrainte de validation	Après l'évaluation

TABLE III.3 – Listes de contraintes applicables par l'optimisation.

On distingue deux méthodes d'applications d'une contrainte en fonction du moment de son application. Les contraintes directement appliquées sur les paramètres de la coque (valeurs L_{tri} , L_{bab} , etc...) peuvent être appliquées au moment de la création d'une nouvelle génération. Ces contraintes ne seront pas visibles dans les résultats car tous les individus générés respecteront ces contraintes. D'autres contraintes demandent l'évaluation du design. Ces contraintes seront visibles dans les résultats car certains individus générés peuvent ne pas les respecter. L'inconvénient de ce type de contrainte est le nombre important d'individus exclus dans les premières générations (et particulièrement pour la première génération formée aléatoirement) car on ne peut prévoir si un individu généré respectera la contrainte. L'avantage est de pouvoir calculer des contraintes complexes au sein même de la séquence d'évaluation (calcul possible dans Mesh ou VPP avec accès au maillage des coques et à aux variables internes).

III.1.6 Implémentation complète

L'implémentation de la procédure d'optimisation est décrite sur la figure III.7. On y distingue cinq éléments : les paramètres d'optimisation, le module d'initialisation, la séquence de calcul (qui comprend le lancement des trois programmes externes que sont mesh, REVA et VPP), la lecture des résultats et l'application des contraintes (pour les contraintes qui demandent l'évaluation du design).

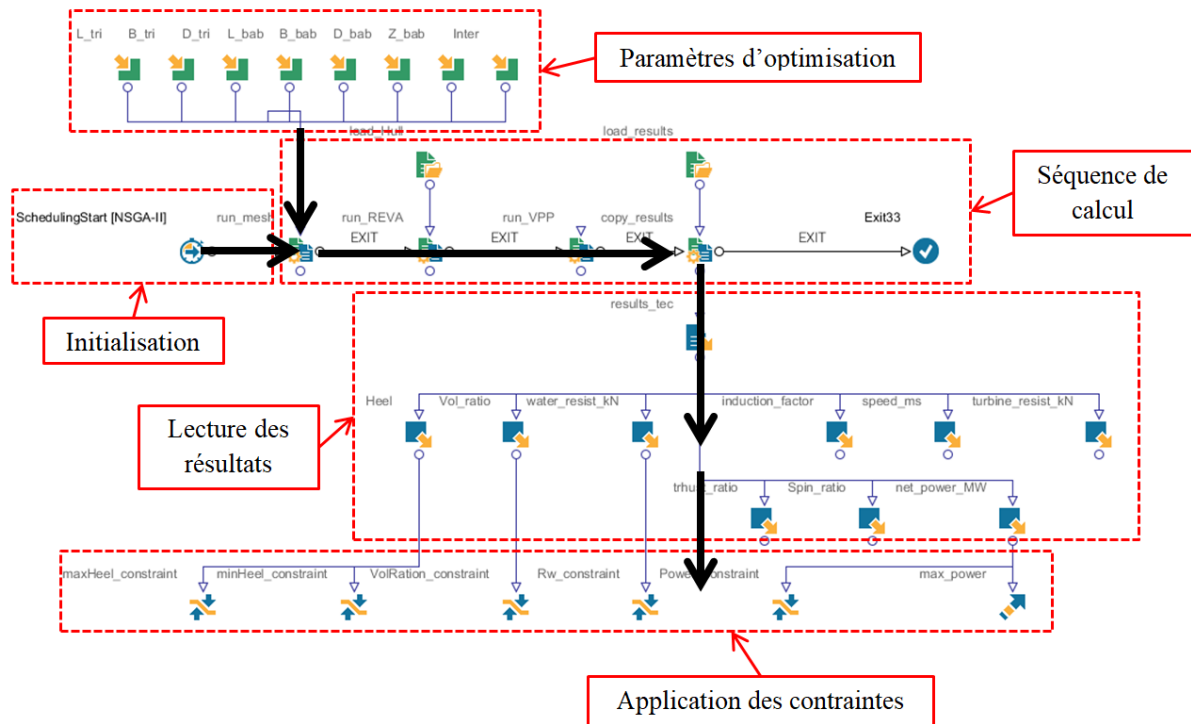


FIGURE III.7 – Schéma de l'implémentation sous ModeFrontier.

III.2 Étude de cas

III.2.1 Configuration de l'étude de cas

III.2.1.1 Configuration générale

On réalise une étude de cas dont les caractéristiques principales sont indiquées dans la table III.4. L'angle de vent choisi est le vent de travers c'est-à-dire $TWA = 90^\circ$. La puissance nominale étant atteinte pour des vitesses de vent de 12 et 14 m/s il sera difficile de comparer les résultats avec ces vitesses de vent (les meilleurs résultats obtenant tous la puissance nominale). On choisit alors une vitesse de vent de 10 m/s. Le classement des résultats est donc effectué suivant ce critère : puissance produite nette à l'angle de vent 90° et à la vitesse de vent 10 m/s.

Élément	Caractéristiques remarquables
Carène	Catamaran, longueur 80 m, écartement 24 m
Déplacement total	460 t
Propulsion	3 rotors Flettner de 5 m * 30 m
Hydro-turbines	2 turbines de diamètre 4,25 m, rendement 80%
Production électrique	1,73 MW électrique net
Production d'hydrogène	29,8 kg/h
Capacité de stockage d'hydrogène	5,0 t

TABLE III.4 – Récapitulatif des éléments principaux du navire.

III.2.1.2 Plages de variation des paramètres

-	Configuration symétrique	Configuration libre
Carènes étudiées	Catamarans symétriques uniquement	Pas de contrainte
Nombre de paramètres	4 paramètres	8 paramètres
Paramètres	$L, B, D,$ $Inter$	$L_{tri}, B_{tri}, D_{tri},$ $L_{bab}, B_{bab}, D_{bab},$ $Inter, \Delta_z$

TABLE III.5 – Détail des configurations d'optimisation symétrique et libre

Comme indiqué dans la partie méthode de ce chapitre, on réalise deux configurations de l'optimisation : une configuration dite symétrique à 4 paramètres et une configuration dite libre à 8 paramètres (voir le tableau III.5). Pour chaque paramètre on applique une plage de variation indiquée dans le tableau III.6.

Les plages de variations de la longueur des coques permettent de limiter l'envergure du navire. On choisit pour la longueur une plage de variation de 40 à 90 m qui permet de rester dans le même ordre de grandeur. Avec un navire plus petit, le placement des 3 rotors Flettner choisis ne serait pas possible. Avec un navire plus grand, on suppose que l'on pourrait placer plus de rotors Flettner et donc que le navire serait d'une gamme supérieure (navire plus grand et plus coûteux avec une production nominale plus élevée). L'écartement choisi de 5 à 30 m se conforme également à cette remarque.

Paramètre	description	Plage de variation (m)
L_{tri}, L_{bab}, L	Longueur	[40,0 ; 90,0]
B_{tri}, B_{bab}, B	Largeur	[1,0 ; 10,0]
D_{tri}, D_{bab}, D	Profondeur	[1,0 ; 10,0]
Δ_z	Hauteur de la coque bâbord	[-2,0 ; 2,0]
$Inter$	Écartement	[5,0 ; 30,0]

TABLE III.6 – Plages de variation des paramètres à optimiser.

Les plages de variation de la largeur et de la profondeur permettent de limiter la génération des formes de carènes à des formes physiquement réalistes. On choisit une variation de 1 à 10 m pour ces paramètres. En effet, une coque de moins d'1 m de largeur paraît peu réaliste, et une coque de plus de 10 m de largeur s'éloigne de l'une des hypothèses de la modélisation (hypothèse d'une coque mince pour le choix du coefficient de forme).

III.2.1.3 Contraintes appliquées

Le moment de redressement pour un navire est le couple engendré par les forces hydrodynamiques de la carène sur son axe de gîte. Il correspond à la capacité du navire à maintenir sa stabilité malgré l'action de forces extérieures, comme par exemple l'action des rotors Flettner. Les forces extérieures (typiquement dues à l'action du vent via la résultante aérodynamique des rotors Flettner) tendent au contraire à faire gîter le navire. Leur action sur l'axe de gîte du navire sera appelé moment de chavirement M_{chav} . Pour un catamaran le moment de redressement présente un point d'inflexion. L'angle de gîte du point d'inflexion, s'il est dépassé peut engendrer le chavirement du navire (c'est-à-dire son retournement complet). Pour un catamaran le point d'inflexion est proche de l'angle où l'une des deux coques ne touche plus l'eau.

La figure III.8 présente la courbe du moment de redressement de la carène de référence en fonction de l'angle de gîte en faisant varier l'écartement entre les deux coques (10, 20 et 30 m). On estime également le moment de chavirement généré par les rotors Flettner. Celui-ci est évalué pour un navire se déplaçant à 10 m/s et pour un vent d'angle 90° et de vitesse 10 m/s. Comme la résultante aérodynamique des rotors Flettner dépend de leur rapport de vitesse k_v , on l'évalue pour un rapport de vitesse bas (2,5) et pour un rapport de vitesse élevée (3,5). Ainsi le moment de chavirement généré par les rotors Flettner se situe entre 6400 et 9400 kNm. Celui-ci est représentée sur la figure par une bande rouge. A noter qu'il pourra être plus important si la vitesse du navire (et donc la vitesse du vent apparent) augmente.

Outre la courbe avec $Inter = 10$ m dont le moment de redressement maximum est faible, les deux autres courbes présentent un point d'inflexion remarquable (à 3,4° pour $Inter = 20$ m et à 5,0° pour $Inter = 30$ m). Ce point d'inflexion indique à la fois la valeur maximum de couple de chavirement admissible par le navire (qui ne doit pas dépasser le couple de redressement indiqué sur la courbe) et l'angle de gîte à ne pas dépasser.

Pour s'assurer de la stabilité des carènes générées malgré la variation de leur forme, on applique alors les deux contraintes suivantes : "les deux coques doivent être dans l'eau", "l'angle de gîte en équilibre quasi-statique ne doit pas dépasser 5° ". Cette condition vise à ne pas dépasser le point d'inflexion décrit précédemment. On remarque cependant que pour les carènes disposant d'un écartement suffisant ($\text{Inter} > 20 \text{ m}$), l'équilibre quasi-statique (qui correspond à l'intersection de la bande rouge avec la courbe $\text{Inter} = 20 \text{ m}$) sera atteint pour des angles de gîte faibles (entre 0 et 1°).

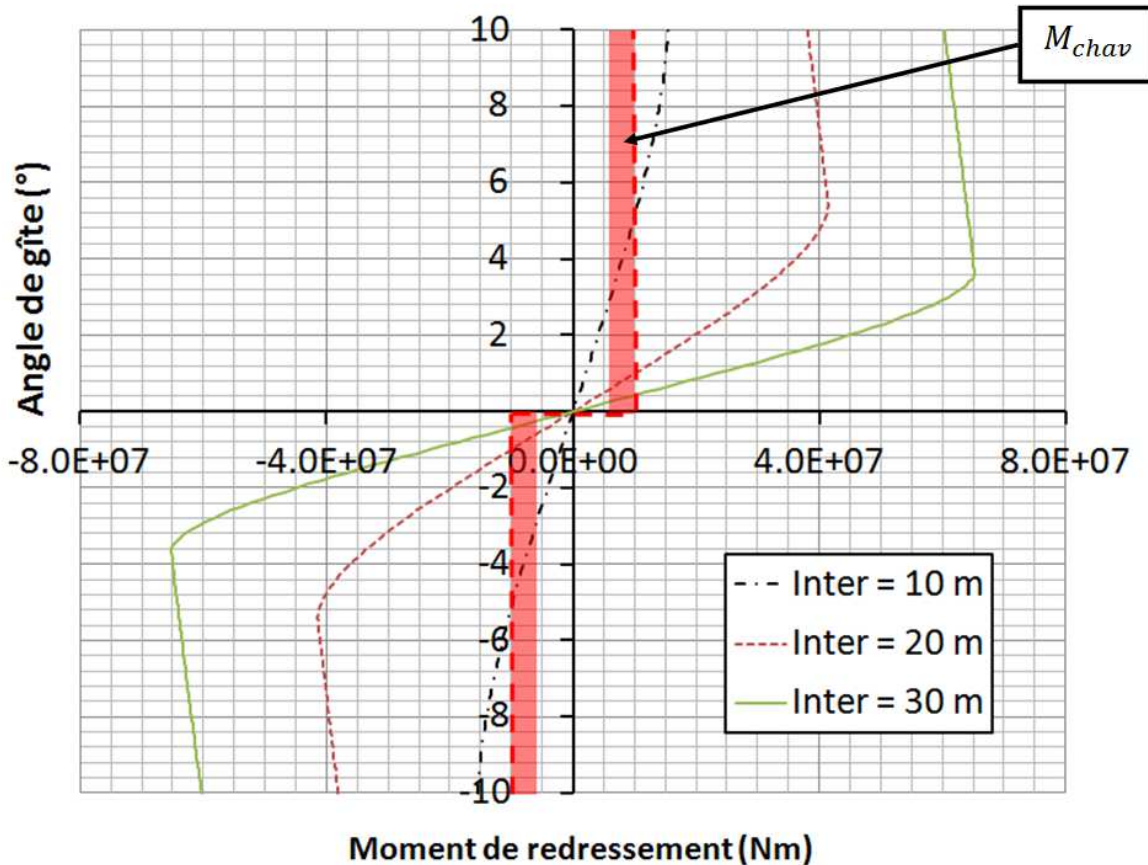


FIGURE III.8 – Courbe de moment de redressement en fonction de l'angle de gîte pour 3 carènes symétriques d'écartement différents (10 m, 20 m et 30 m). Les bandes rouges représentent le moment de chavirement estimé M_{chav} .

III.2.1.4 Nombre et taille des générations

En respectant les paramètres sélectionnés pour l'algorithme d'optimisation les tailles de génération sont de 32 individus pour l'optimisation libre et de 16 individus pour l'optimisation symétrique. On choisit de porter l'optimisation sur 80 générations.

III.2.2 Remarques générales sur les résultats

III.2.2.1 Résultat de référence

Le résultat obtenu avant optimisation (décrit dans la partie II.3.2.3) est utilisé comme résultat de référence : pour un vent réel de vitesse 10 m/s et d'angle 90°, la puissance nette produite par un navire de production est de 1,02 MW. Il sera utilisé pour évaluer les gains de l'optimisation. Avec la carène de référence, la répartition des forces est comme suit : résistance à l'avancement de la carène de 67 kN et résistance à l'avancement de la turbine de 167 kN. Cela correspond à un rapport de force de 69%. La vitesse d'avance est de 10,0 m/s.

III.2.2.2 Temps de calcul

Le nombre d'individus évalués durant l'optimisation libre est de 2560 (32 individus par génération sur 80 générations). Sur le processeur utilisé (Intel(R) i7-7700), l'évaluation complète d'un individu prend 30 à 35 mn. 99% du temps d'évaluation est consommé par l'évaluation de la résistance à l'avancement sous REVA, les autres étapes de calcul (en Fortran) étant très rapides. Ce temps de calcul est toutefois fortement variable. Il dépend d'une part des caractéristiques du cas étudié (qui influent sur la taille du maillage) et d'autre part sur la faisabilité de l'évaluation. En effet certains individus ne peuvent pas être évalués correctement (par exemple si le volume de la coque n'est pas suffisant par rapport au déplacement du navire). Dans ce cas, le calcul potentiel sous REVA échoue ou n'est pas lancé et le temps d'évaluation de cet individu est fortement réduit. Ainsi, bien que le temps d'évaluation théorique soit de 1280 h (soit 53 jours), le calcul n'a duré que 336 h (soit 14 jours).

Un temps de calcul important est à prendre en compte pour les développements futurs du projet. En effet l'ajout de nouveaux paramètres à optimiser augmente d'une part le nombre d'individus par génération (à raison de 4 individus par génération supplémentaire pour chaque paramètre ajouté), d'autre part le nombre de générations nécessaires à la convergence (avec plus de paramètres, les combinaisons de ces paramètres sont plus nombreuses et l'espace des solutions à balayer est plus grand).

On remarque également que le temps d'évaluation de chaque individu est un élément clé. Cela a été pris en compte dans les choix effectués lors de la mise en place du calcul (langage choisi, type d'évaluation de la traînée, etc...). La complexification du calcul (par l'ajout d'un degré de liberté par exemple), aura un impact fort sur le temps d'évaluation d'un individu et par conséquent sur le temps total de l'optimisation. L'ordre de grandeur est le suivant : une augmentation de une minute du temps d'évaluation de chaque individu conduit à l'augmentation du temps d'optimisation total théorique de 42 heures.

Pour des développements ultérieurs, des solutions sont toutefois possibles pour gérer cette contrainte. On peut en effet réaliser en partie le calcul sur plusieurs cœurs simultanément (exemple de lancement de plusieurs instances de REVA en simultané). Cette solution est tout à fait adaptée aux algorithmes génétiques car il est possible d'évaluer toute une génération simultanément (dans l'étude de cas menée ici on pourrait réduire le temps d'évaluation d'une génération au temps d'évaluation d'un seul design soit 30 à 35 mn par génération).

III.2.2.3 Erreurs rencontrées

On remarque que l'algorithme a parfois été attiré vers de valeurs intéressantes mais qui ne correspondaient pas à une modélisation physique valide. Certaines erreurs de la modélisation, non repérées jusqu'à lors ont ainsi pu être identifiées. La figure figure III.9 présente un exemple de ce type. Le graphique montre la puissance nette produite pour chaque individu évalué. Les individus en rouge ne respectent pas les contraintes. Sur ce résultat on observe qu'il y a un grand nombre d'individus hors contrainte mais avec des valeurs de puissance très élevées (jusqu'à 3,2 MW). Parmi les individus qui respectent les contraintes la puissance produite est également élevée (plus de 1,6 MW soit presque la puissance nominale).

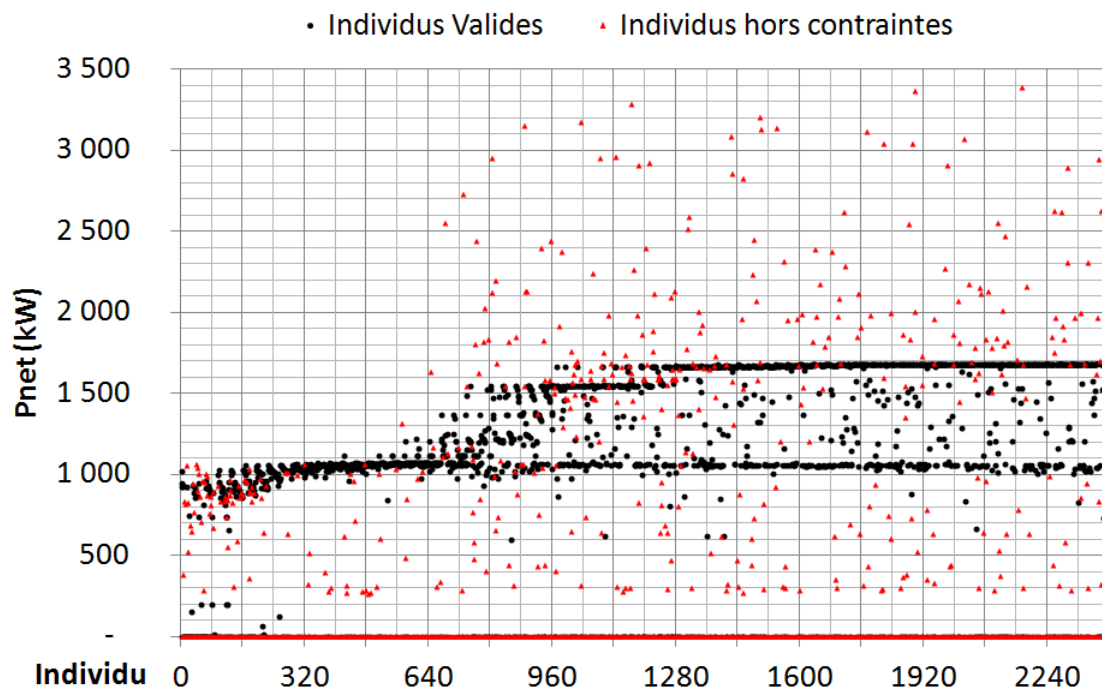


FIGURE III.9 – Puissance nette produite par les tous les individus (avec erreur détectée dans l'évaluation de la puissance nette).

En regardant dans le détail, une erreur sur le calcul de la résistance à l'avancement a été trouvée (on trouve par exemple des valeurs nulles ou négatives de la résistance à l'avancement). L'erreur détectée ici provient du chevauchement de maillages par Reva pour le calcul de la résistance à l'avancement dans le cas particulier d'une coque rasant la surface libre (incohérence entre le nombre de coques immergées déclaré et les paramètres du maillage).

Pour traiter cette erreur deux méthodes ont été appliquées. D'une part la source d'erreur en elle-même a été traitée afin d'obtenir un résultat valide même dans les cas de coques rasant la surface libre. La correction a consisté en un ajustement du calcul de l'enfoncement réalisé par REVA et permettant de déterminer le nombre de coques immergées. D'autre part une détection d'erreur a été mise en place. Cette détection permet d'identifier et d'exclure les résultats présentant ce type d'erreur. La détection de l'erreur consiste ici à vérifier que la valeur de résistance à l'avancement retenue est physiquement réaliste (valeur positive non nulle).

III.2.3 Résultats de l'optimisation en configuration symétrique

III.2.3.1 Évaluation de la puissance nette

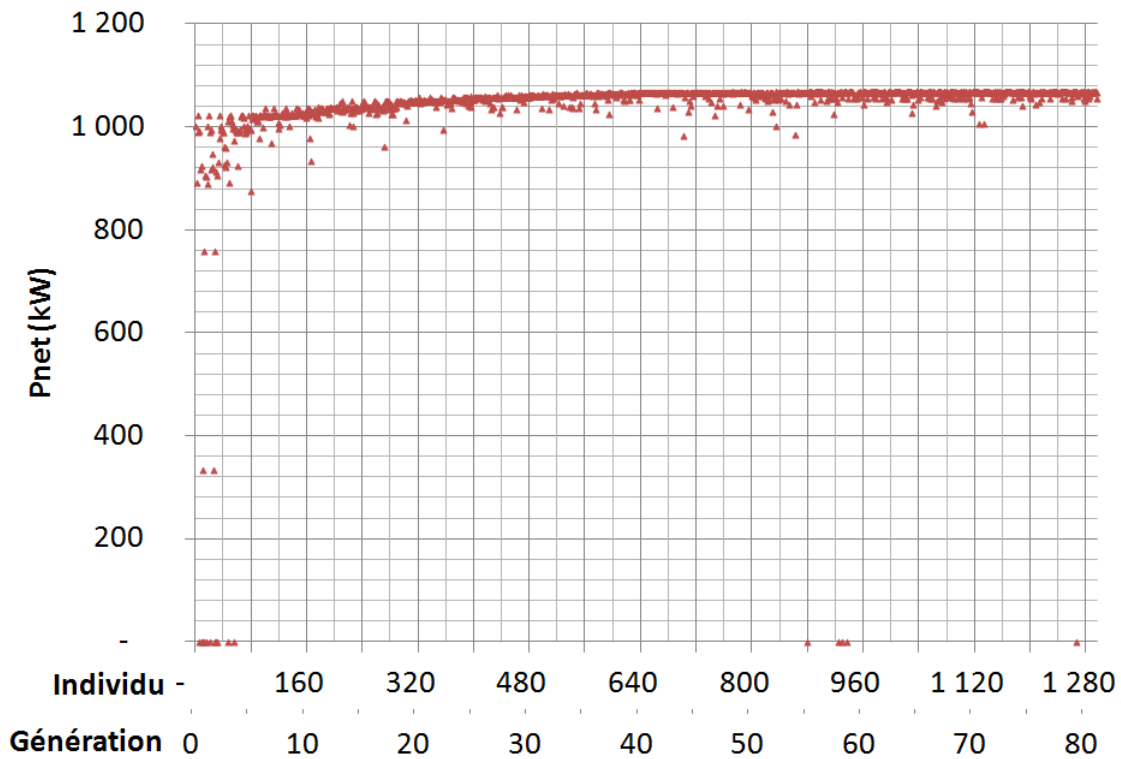


FIGURE III.10 – Puissance nette obtenue par chaque individu (configuration symétrique).

Pour cette optimisation, 1280 individus ont été évalués. Le graphique III.10 montre la puissance nette obtenue par chaque individu évalué. Ce graphique montre à la fois les individus respectant les contraintes (puissance supérieure à 0) et les individus ne respectant pas les contraintes (puissance égale à 0). On réalise également une étude par génération, disponible sur le graphique III.11. Pour chaque génération on calcule : la puissance maximale obtenue (bord supérieur de la zone colorée en rouge pâle), la puissance minimale obtenue (bord inférieur de la zone colorée en rouge pâle) et la moyenne des puissances de la génération (courbe rouge). Ces valeurs ne prennent pas en compte les individus hors contraintes (dont la puissance nette est nulle).

Sur les premières générations la puissance produite par chaque individu est très variable. La dispersion des résultats (écart entre la puissance maximale et la puissance minimale de chaque génération) diminue rapidement. A partir de la dixième génération, la dispersion n'est plus que de 1 à 10% (voir la largeur de la zone rouge pâle qui diminue au fur et à mesure des générations sur le graphique III.11). Cela montre la bonne convergence de l'algorithme vers le résultat final.

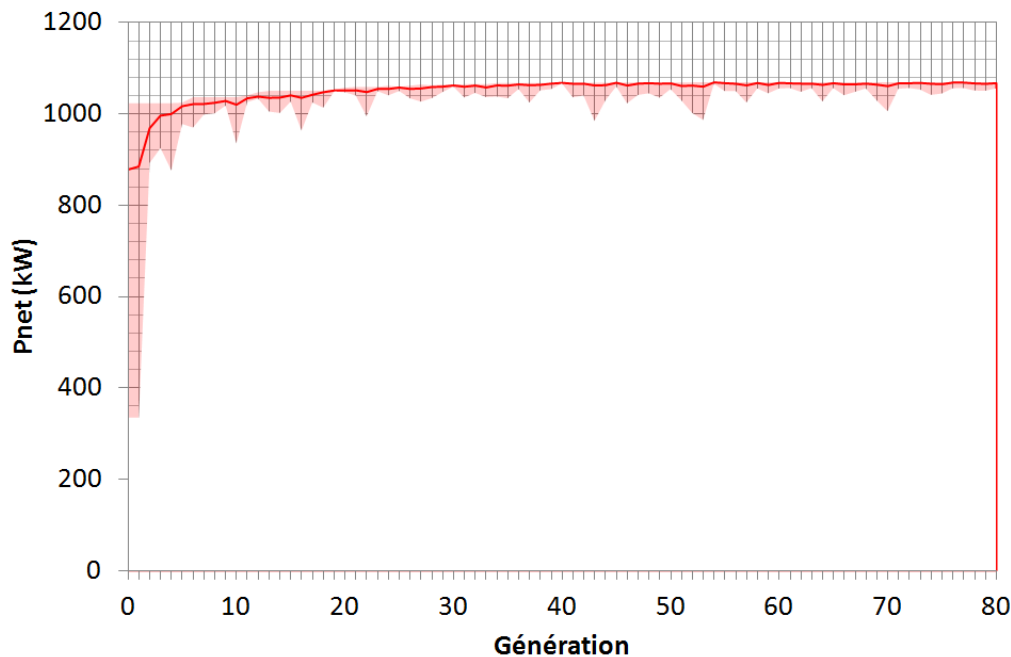


FIGURE III.11 – Puissance maximale, minimale et moyenne de chaque génération.

Le nombre d'individus hors contraintes dans la première génération est élevé (31%). Cela est dû au caractère aléatoire de la génération initiale. A partir de la génération 4 presque tous les individus respectent les contraintes (de la génération 4 à la génération 80, il n'y a que 5 individus qui ne respectent pas les contraintes). Cela montre la capacité de l'algorithme à sélectionner au fur et à mesure des générations, les individus susceptibles de respecter les contraintes. Il reste quelques individus qui ne respectent pas les contraintes même dans les générations tardives car l'algorithme introduit des valeurs aléatoires des paramètres grâce à l'opérateur de mutation.

La puissance moyenne augmente à chaque génération jusqu'à rejoindre la puissance maximale (voir le tableau III.7). La puissance maximale de la première génération est de 1,02 MW. Cela correspond à la puissance obtenue par la référence. A la génération 40, la puissance maximale obtenue est de 1,07 MW soit une augmentation de 4,9% par rapport à la référence. Ce gain est faible compte tenu des incertitudes du modèle. La puissance maximale n'évolue pas sur les générations suivantes. L'optimisation a donc convergé à la génération 40.

-	Puissance nette maximale	Gain cumulé	Gain
Référence	1,02 MW	-	-
Génération initiale	1,02 MW	+ 0,0%	+ 0,0%
Génération 40	1,07 MW	+ 4,9%	+ 4,9%
Génération 80	1,07 MW	+ 0,0%	+ 4,9%

TABLE III.7 – Puissance maximale obtenue par la génération 0, 40 et 80 en comparaison de la puissance obtenue par la référence.

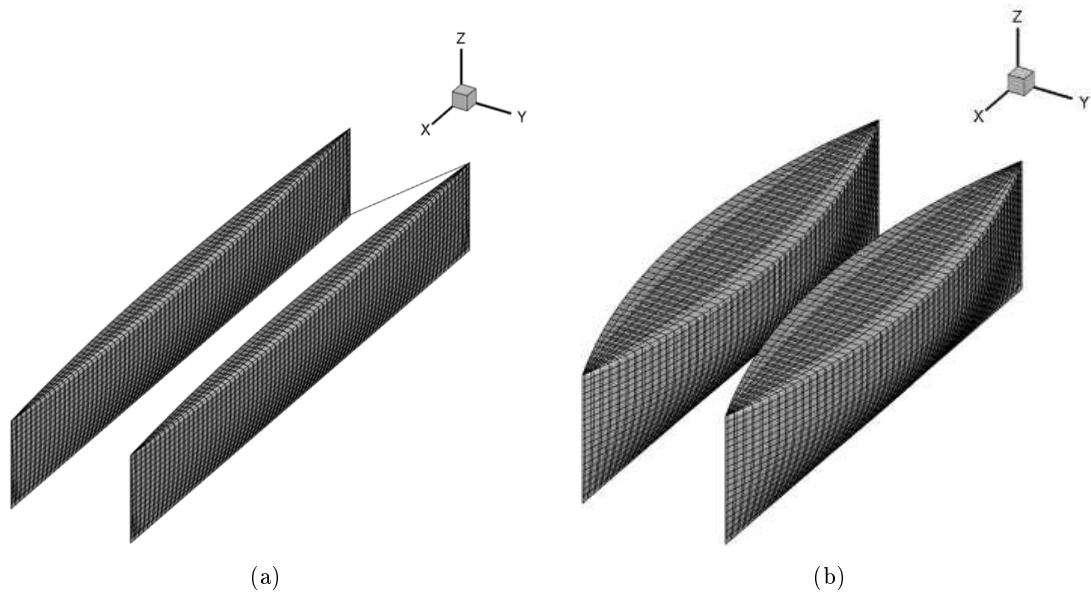


FIGURE III.12 – Deux exemples d'individus générés représentés en 3D.

III.2.3.2 Exemples d'individus générés

La plage de variation des paramètres permet une grande variété de formes de carènes (longueur comprise entre 40 et 90 m, largeurs et profondeurs entre 1 et 10 m). Il est ainsi possible de générer des carènes fines (exemple de carène fine sur la figure III.12a) et des carènes plus larges et plus profondes (exemple de carène large sur la figure III.12b). Ces deux carènes sont des exemples d'individus générés durant l'optimisation.

III.2.3.3 Description du meilleur individu

Paramètre	Meilleur résultat symétrique	Carène de référence
Longueur (L)	84,1 m	80,0 m
Largeur (B)	3,94 m	6,67 m
Profondeur (D)	1,20 m	1,88 m
Écartement ($Inter$)	20,4 m	24 m

TABLE III.8 – Paramètres de la carène du meilleur individu.

Description du navire L'individu 1291 de la génération 80 a obtenu la meilleure puissance produite (1,07 MW). Ses caractéristiques sont détaillées dans la table III.8. La figure III.13 montre une représentation 3D de la carène. Par rapport à la carène de référence, cette carène est : plus effilée (plus longue mais moins large et moins profonde) et a un écartement entre les coques plus faible. En fonctionnement, sa vitesse d'avance est de 10,8 m/s, son rapport de force de 68% et son angle de gîte de $0,8^\circ$ (voir le tableau III.9).

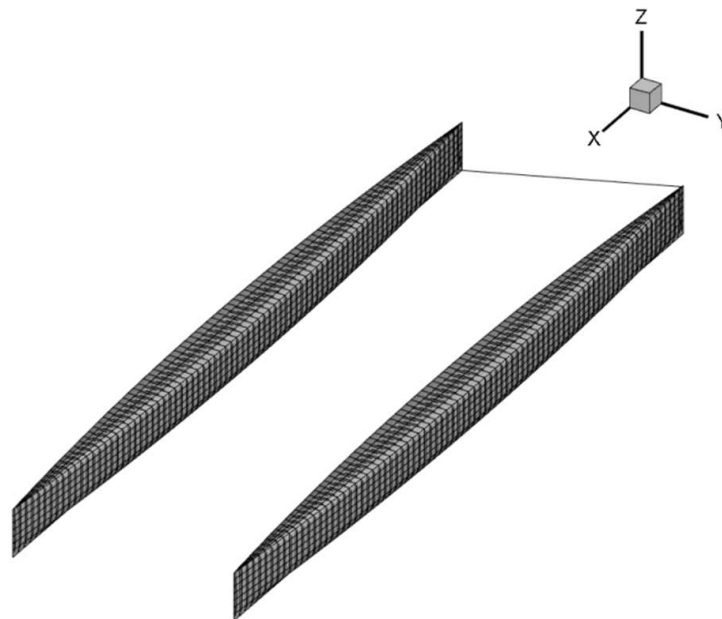


FIGURE III.13 – Représentation 3D du meilleur individu de l'optimisation symétrique.

Caractéristique	Valeur
Puissance nette	1169 kW
Vitesse d'avance	10,81 m/s
Angle de gîte	0,82°
Rapport de vitesse (rotors)	3,2
Rapport de force	68%
Résistance à l'avancement des hydrogénérateurs	158,7 kN
Résistance à l'avancement de la carène	74,6 kN

TABLE III.9 – Caractéristiques de fonctionnement de la meilleure carène

Courbe polaire de la puissance nette De la même manière que dans le chapitre 2, on réalise une courbe polaire de la puissance nette produite III.14. Sur ce graphique sont représentés les résultats du navire de référence et les résultats du résultat de l'optimisation symétrique. Pour rappel, la lecture de la courbe polaire est comme suit :

L'angle indiqué (TWA) correspond à l'angle du vent réel par rapport à la direction d'avance du navire (0° navire face au vent, ±90° navire vent de travers et 180° navire vent arrière). Le rayon indiqué (P_{net}) correspond à la valeur étudiée (ici la puissance nette produite). Chaque couleur correspond à une vitesse de vent réel (TWS) indiquée dans la légende.

On observe les mêmes tendances et la même forme de courbe pour la référence et pour le résultat de l'optimisation symétrique. L'écart entre les deux courbes est très faible. La puissance nette obtenue par le résultat de l'optimisation est toutefois légèrement supérieure pour chaque angle de vent.

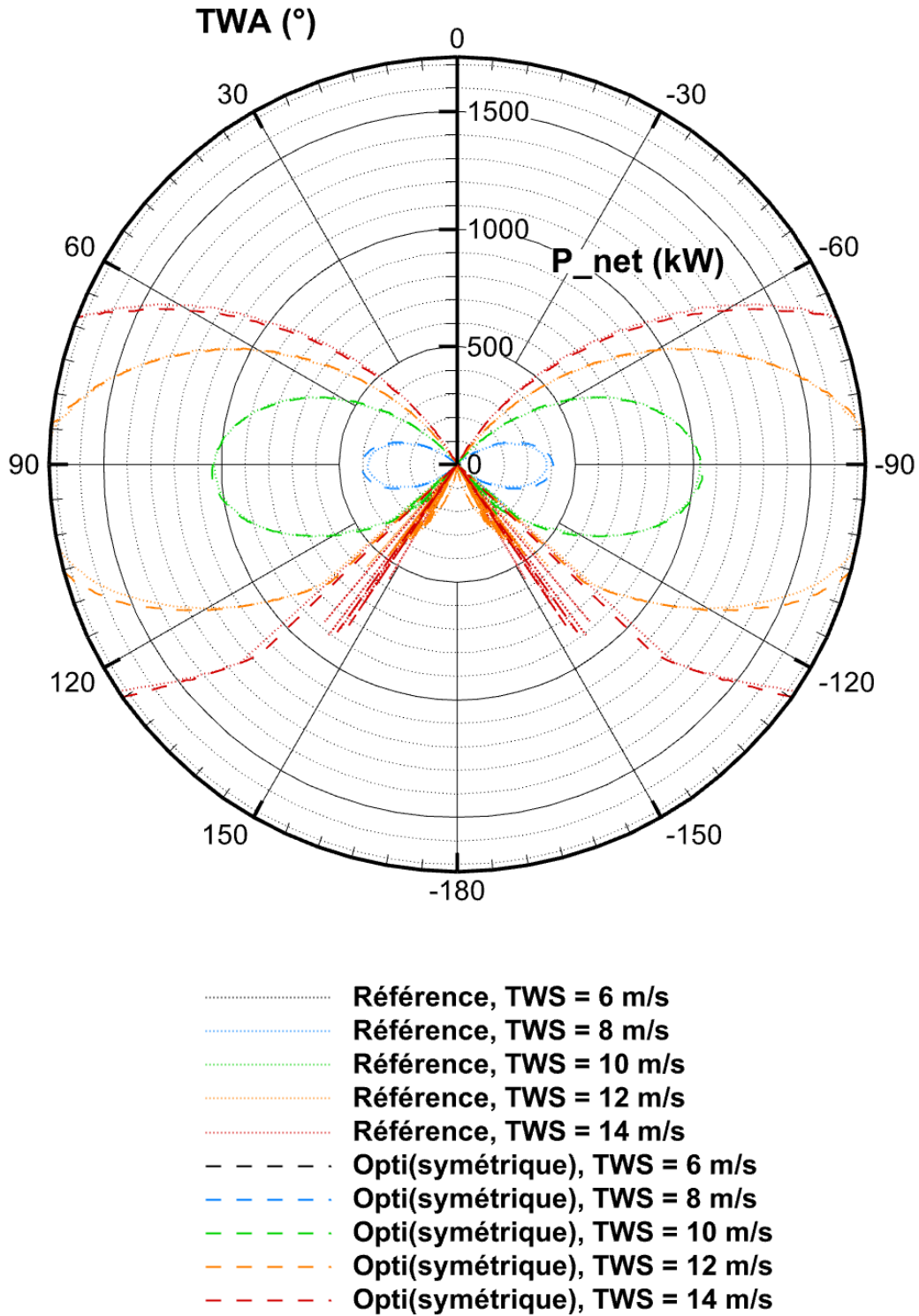


FIGURE III.14 – Courbe polaire de la puissance nette (P_{net}) du meilleur individu de l'optimisation symétrique (traits pleins) et de la référence (traits pointillés).

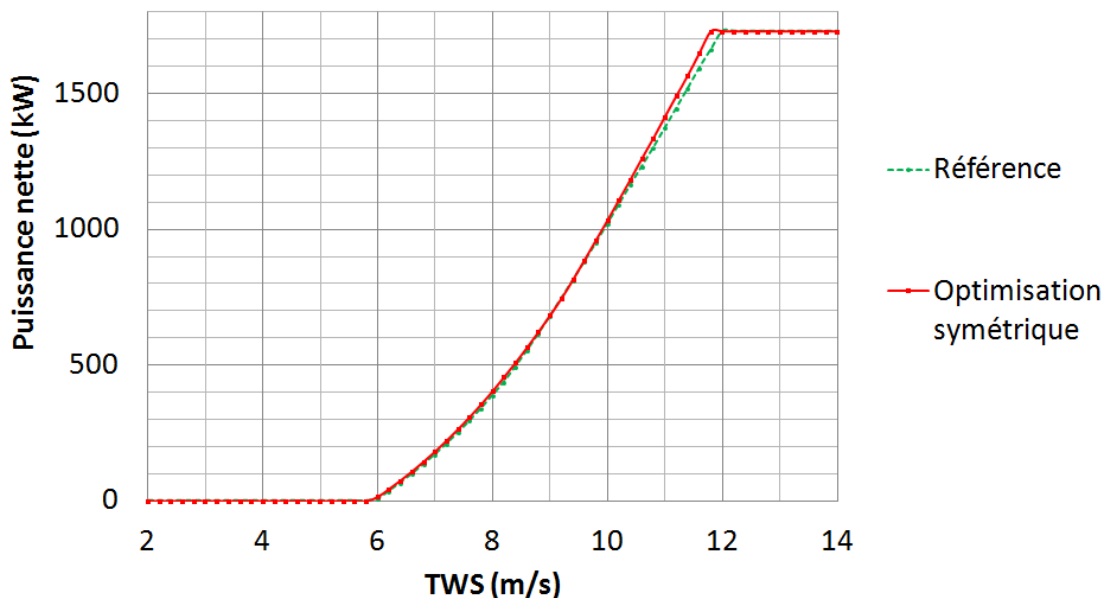


FIGURE III.15 – Puissance nette du meilleur résultat de l'optimisation symétrique et de la référence en fonction de la vitesse du vent réel avec $TWA = 90^\circ$.

On trace également la courbe de la puissance produite en fonction de la vitesse du vent réel (voir figure III.15). On remarque sur cette courbe que le tracé pour du résultat de l'optimisation symétrique est très proche du tracé de la référence. Le résultat de l'optimisation symétrique est légèrement meilleur pour les vitesses de vent élevées (léger gain de puissance dans la zone $11\text{m/s} < TWS < 12\text{m/s}$).

III.2.4 Résultat de l'optimisation en configuration libre

L'optimisation en configuration libre a porté sur 80 générations comme pour l'optimisation symétrique. Il y a en revanche 32 individus par génération ce qui porte le nombre total d'individus évalués à 2560. Les résultats de l'optimisation libre sont présentés de manière similaire à ceux de l'optimisation symétrique c'est-à-dire :

Le graphique III.16 montre la puissance nette obtenue par chaque individu durant l'optimisation. Ce graphique montre à la fois les individus respectant les contraintes (puissance supérieure à 0) et les individus ne respectant pas les contraintes (puissance égale à 0). Le graphique III.17 montre, pour chaque génération les valeurs suivantes : la puissance maximale obtenue (bord supérieur de la zone bleu pâle), la puissance minimale obtenue (bord inférieur de la zone bleu pâle) et la moyenne des puissances de la génération (courbe noire). Ces valeurs ne sont calculés qu'avec les individus respectant les contraintes (c'est-à-dire dont la puissance obtenue est supérieure à 0).

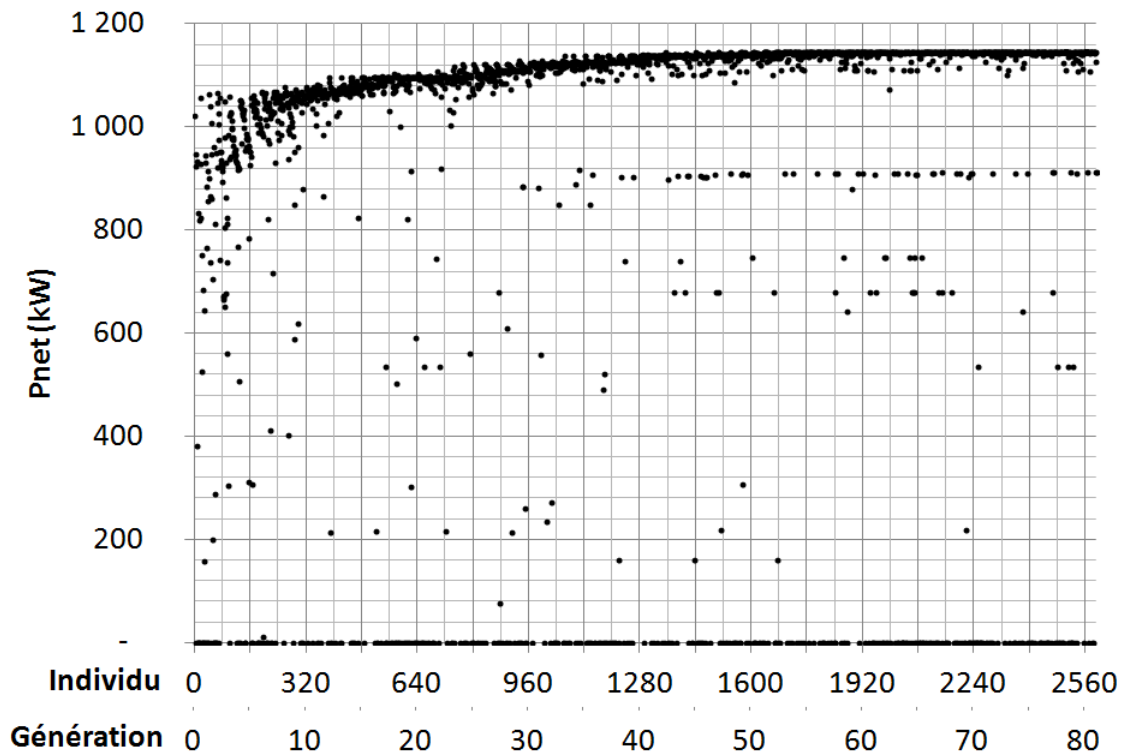


FIGURE III.16 – Puissance nette obtenue par chaque individu (configuration libre).

III.2.4.1 Évaluation de la puissance nette

Les puissances obtenues par les premières générations sont très variables (voir graphique III.16). Cela est dû au caractère aléatoire de la génération initiale et à l'introduction de mutations aléatoires (via l'opérateur de mutation de l'algorithme). Les puissances obtenues initialement (première génération) sont comprises entre 0 et 1,05 MW. On remarque que l'évaluation de nombreux individus aléatoires permet déjà de dépasser la puissance atteinte par la référence (1,02 MW). Un certain nombre d'individus obtiennent un résultat de 0 dû au non respect d'au moins une contrainte.

-	Puissance nette maximale	Gain cumulé	Gain
Référence	1,02 MW	-	-
Génération initiale	1,06	+ 3,9%	+ 3,9%
Génération 40	1,13 MW	+ 10,8%	+ 6,6%
Génération 80	1,15 MW	+ 12,7%	+ 1,8%

TABLE III.10 – Puissance maximale obtenue par la génération 0, 40 et 80 en comparaison de la puissance obtenue par la référence.

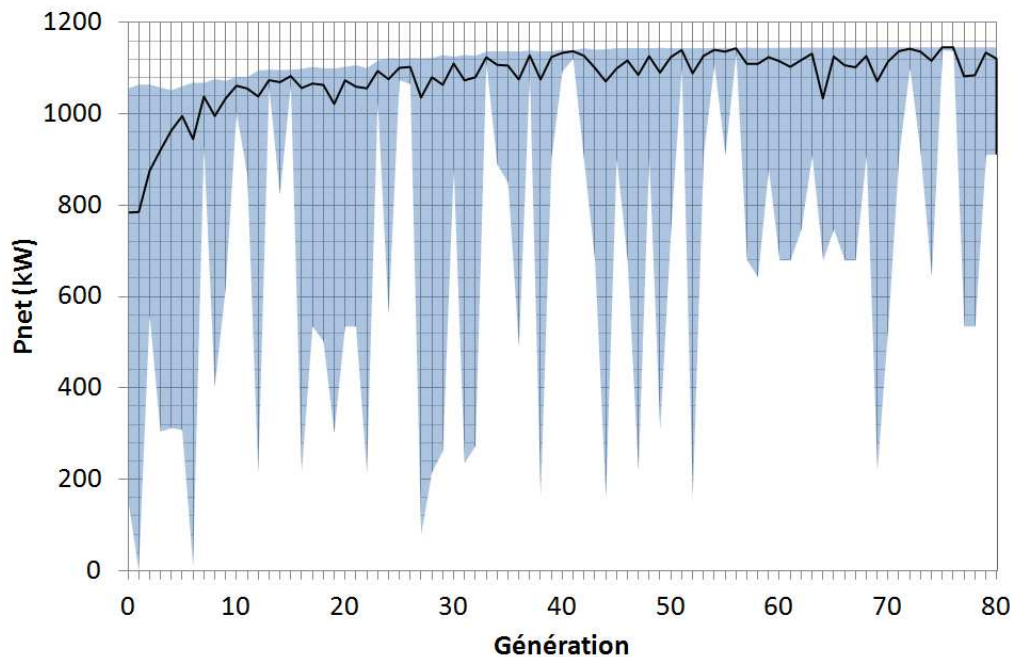


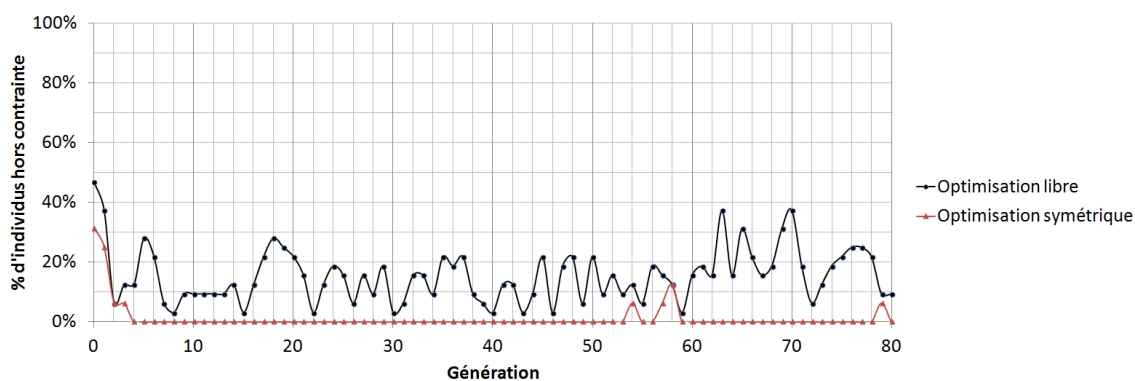
FIGURE III.17 – Puissance maximale, minimale et moyenne de chaque génération.

Selon le graphique III.17, on observe que la puissance maximale (bord supérieur de la zone colorée) et la moyenne de chaque génération (courbe noire) augmentent régulièrement durant l'optimisation. Le tableau III.10 montre la puissance obtenue par les générations 0, 40 et 80 ainsi que l'écart de puissance avec la puissance obtenue par la référence. La puissance maximale obtenue en fin d'optimisation est de 1,15 MW soit 12,7% de gain par rapport à la puissance obtenue par la référence. A la génération initiale, le gain de puissance nette est de 3,9% par rapport à la référence. Le gain est ensuite important sur les 40 premières générations (jusqu'à une puissance de 1,13 MW à la génération 40). L'évolution est ensuite plus faible sur les générations suivantes (écart de 1,8% entre la génération 40 et la génération 80).

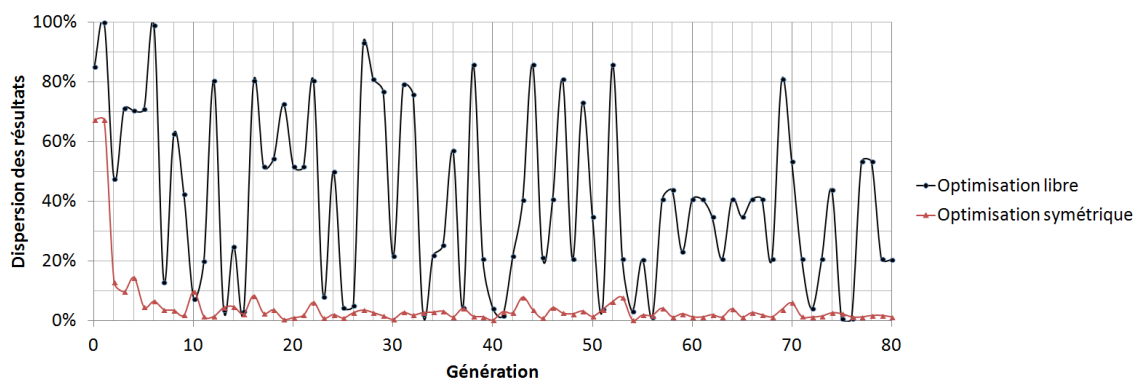
III.2.4.2 Dispersion des résultats

La proportion d'individus ne respectant pas les contraintes est plus importante que pour l'optimisation libre. On observe en effet sur le graphique III.16 un grand nombre d'individus obtenant une puissance de 0. On trace l'évolution du pourcentage d'individus hors contraintes pour chaque génération pour les optimisations libre et symétrique (voir graphique III.18a). Pour l'optimisation libre, le pourcentage d'individus ne respectant pas au moins l'une des contraintes est de 47% à la génération initiale et de 9% pour la génération 80. Il est, pour toutes les générations, plus important que pour l'optimisation symétrique.

On observe également une grande dispersion des résultats. Le graphique III.17 montre en effet un écart important entre la puissance minimale et la puissance maximale pour toutes les générations (correspondant à l'étendue de la zone bleu pâle). Sur le graphique III.16, on peut également identifier un grand nombre d'individus obtenant une puissance faible par rapport à leur génération (voir le nombre important de points compris entre 0 et 1000 kW).



(a)



(b)

FIGURE III.18 – a) Pourcentage d'individus hors contrainte de chaque génération. b) Dispersion des résultats de chaque génération.

On trace le graphique de dispersion de puissance pour chaque génération III.18b. La valeur indiquée correspond à l'écart en pourcentage entre la puissance la plus faible et la plus élevée de chaque génération. Les individus hors contraintes (obtenant une puissance de 0) ne sont pas pris en compte. La dispersion est fortement variable d'une génération à l'autre mais est globalement importante durant toute l'optimisation libre (courbe noire). Ces valeurs sont comprises entre 0 et 90%. Les valeurs obtenant 0 étant exclues l'écart calculé ne peut atteindre 100%. Un écart de 90% est toutefois significatif d'une dispersion maximale.

Cet élément, ainsi que la génération régulière d'individus hors contraintes, met en évidence la forte variabilité de la puissance nette évaluée durant l'optimisation libre. En effet le plus grand nombre de paramètre par rapport à l'optimisation symétrique permet de générer des formes de carène plus diverses. Il peut y avoir par exemple des écarts important entre les volumes immergés des deux coques et un écart de hauteur entre les coques par l'introduction du paramètre Δ_z .

III.2.4.3 Exemples d'individus générés

Paramètre	Plage de variation (m)
Longueur (L_{tri} , L_{bab})	[40,0 ; 90,0]
Largeur (B_{tri} , B_{bab})	[1,0 ; 10,0]
Profondeur (D_{tri} , D_{bab})	[1,0 ; 10,0]
Hauteur de la coque bâbord (Δ_z)	[-2,0 ; 2,0]
Écartement ($Inter$)	[5,0 ; 30,0]

TABLE III.11 – Plages de variation des paramètres à optimiser.

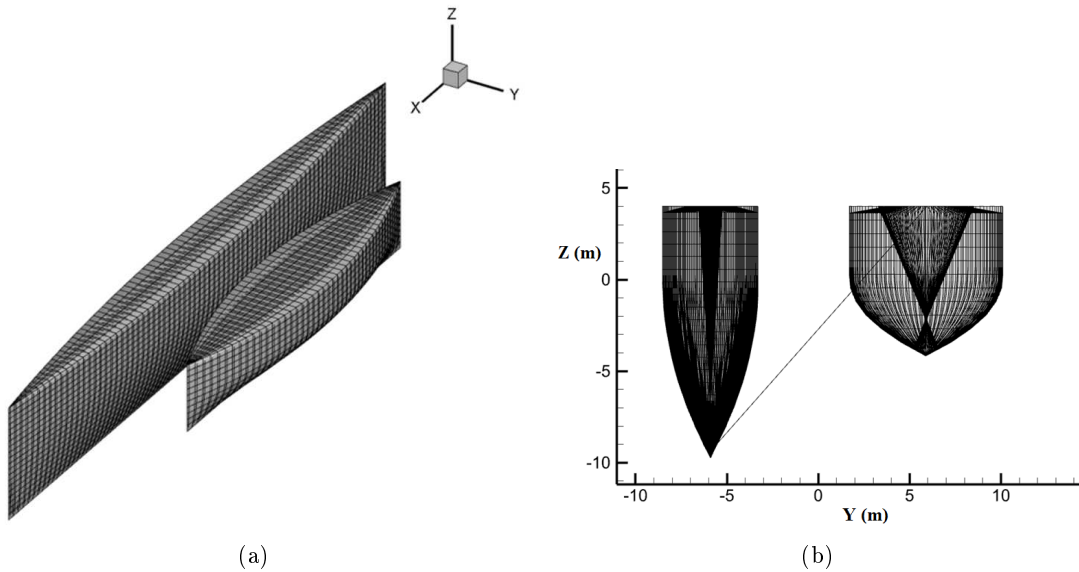


FIGURE III.19 – Exemple d'individu généré ne respectant pas les contraintes. a) vue en 3D. b) Vue en coupe suivant le plan (y,z).

La plage de variation des paramètres est similaire à celle de l'optimisation symétrique : la longueur des coques varie de 40 à 90 m et les largeurs et profondeurs varient de 1 à 10 m. La distance $Inter$ varie de 5 à 30 m. Le nouveau paramètre Δ_z peut varier de -2 m à +2 m. La forte variabilité de ces paramètres est susceptible de générer des individus ne respectant pas les contraintes. Par exemple la carène représentée sur la figure III.19 possède une des coques située très bas par rapport à l'autre (écart d'environ 5 m du point le plus bas). Cela est en particulier possible grâce aux plages de variation combinées des paramètres Δ_z , B_{tri} et B_{bab} (B_{tri} et B_{bab} étant la profondeur des coques tribord et bâbord). Sur la figure III.19b on visualise l'écart de hauteur entre les deux coques, qui ne permet pas, dans les positions de faible angle gîte, aux deux coques de toucher l'eau simultanément.

III.2.4.4 Description du meilleur individu

Paramètre	Coque tribord (au vent)	Coque bâbord (sous le vent)
Longueur (L_{star}, L_{port})	90,0 m	54,0 m
Largeur (B_{star}, B_{port})	5,07 m	3,52 m
Profondeur (D_{star}, D_{port})	1,29 m	1,89 m
Hauteur de la coque bâbord (Δ_z)	-	1,87 m
Écartement ($Inter$)	17,1 m	-
Rapport de volume	0,9	-

TABLE III.12 – Paramètres la meilleure carène générée.

Description du navire L'individu 2592 appartenant à la génération 80 obtient le meilleur résultat (1,15 MW). Ses caractéristiques sont présentées dans la table III.12. Il s'agit d'un catamaran fortement asymétrique. La carène est représentée en 3D sur la figure III.20a. Elle est constituée d'une grande coque tribord (coque principale) et d'une coque bâbord plus petite (flotteur). Dans la configuration évaluée durant l'optimisation, la coque tribord principale est située au vent et le flotteur bâbord est situé sous le vent. Cela est représenté par le rapport de volume de 0,9 (au repos la coque tribord représente 90% du volume immergé). La figure III.20b montre une vue en coupe permettant de visualiser cette écart de volume immergé.

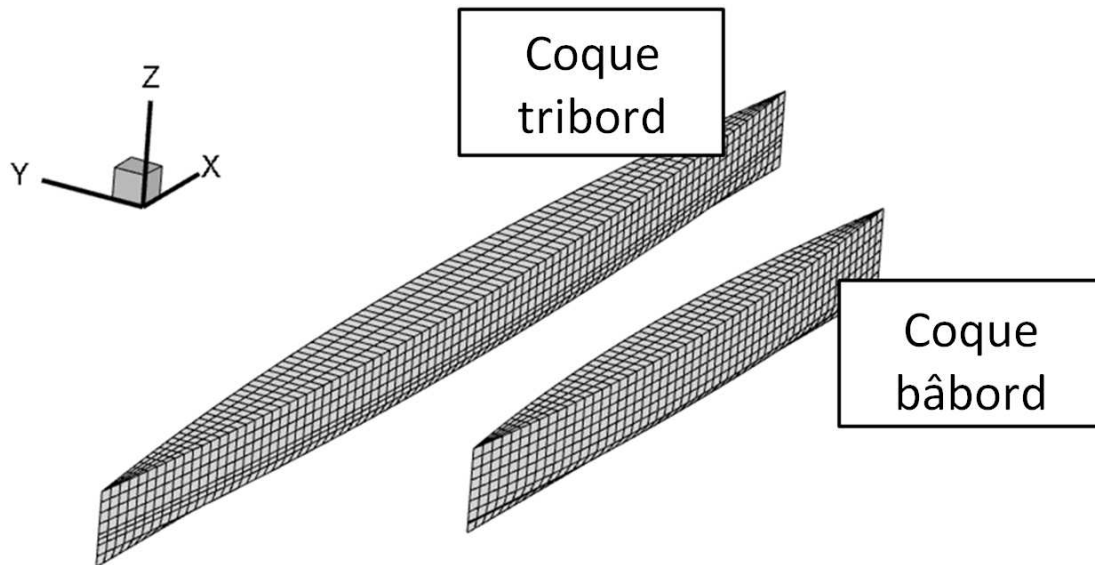
Caractéristique	Valeur
Puissance nette	1147 kW
Vitesse d'avance	11,02 m/s
Angle de gîte	0,24°
Rapport de vitesse (rotors)	3,1
Rapport de force	71%
Résistance à l'avancement de la turbine	164,7 kN
Résistance à l'avancement de la carène	67,2 kN

TABLE III.13 – Caractéristiques de fonctionnement de la meilleure carène

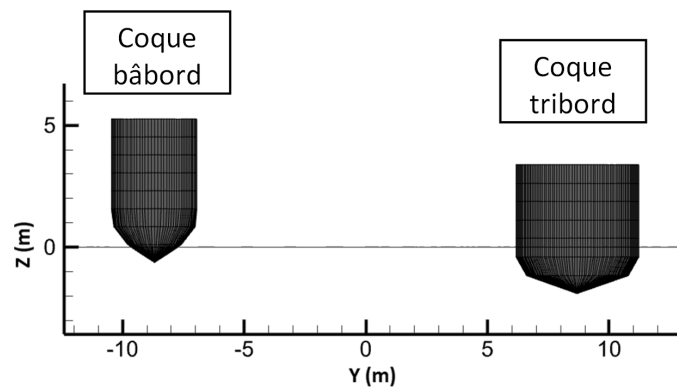
En régime stationnaire, le navire se déplace à la vitesse de 11,0 m/s et à la gîte 0,2°. Ces valeurs correspondent aux valeurs habituellement obtenues (vitesse d'avance légèrement plus élevée que la vitesse du vent réel, angle gîte faible). Ce navire est plus rapide de 1,0 m/s que le navire de référence.

Son rapport de force (ratio entre la traînée due à la turbine et la traînée totale du navire) est de 71%. C'est une valeur élevée du rapport mais pas la meilleure obtenue. Ce paramètre seul n'est pas représentatif de la puissance produite. On trouve des individus avec un rapport de force très élevé (le maximum est de 93%) mais avec une vitesse d'avance faible et une puissance produite faible (l'individu qui a un rapport de force de 93% ne produit que 0,35 MW à une vitesse de 4,9 m/s).

De la même manière certains individus obtiennent une vitesse d'avance élevée (maximum de 15,1 m/s) mais qui, combinée à un rapport de force faible, ne permet pas d'obtenir une puissance produite élevée. Finalement, c'est la combinaison de ces deux caractéristiques qui est corrélée à la puissance produite : les individus qui combinent une vitesse d'avance élevée et un rapport de force élevé sont toujours associés à une puissance produite élevée.



(a)



(b)

FIGURE III.20 – Représentation de la meilleure carène a) Vue 3D. b) Vue en coupe suivant le plan (y,z) .

Spécificités d'un navire non-symétrique Le fait de concevoir un navire non symétrique apporte quelques spécificités. En effet son comportement et ses performances ne seront pas identiques si le vent vient de la gauche (c'est-à-dire en bâbord amure, coque bâbord au vent) ou si le vent vient de la droite (c'est-à-dire en tribord amure, coque bâbord sous le vent).

Pour ce type de carène on envisage deux fonctionnements présentés sur la figure III.21. Dans le fonctionnement dit "classique", le navire fonctionne de manière identique à un navire symétrique. Il navigue à la fois en tribord et en bâbord amure. Il est capable de faire demi-tour en tournant. Il présente, du fait de sa dissymétrie des performances différentes sur une amure et sur l'autre. Dans le second fonctionnement dit "à double sens", on réalise un navire qui peut se déplacer aussi bien en avant qu'en arrière. Dans ce cas il présentera une symétrie suivant le plan (y,z) . Ce fonctionnement permet de toujours naviguer sur l'amure la plus performante (par exemple ici avec la coque bâbord sous le vent).

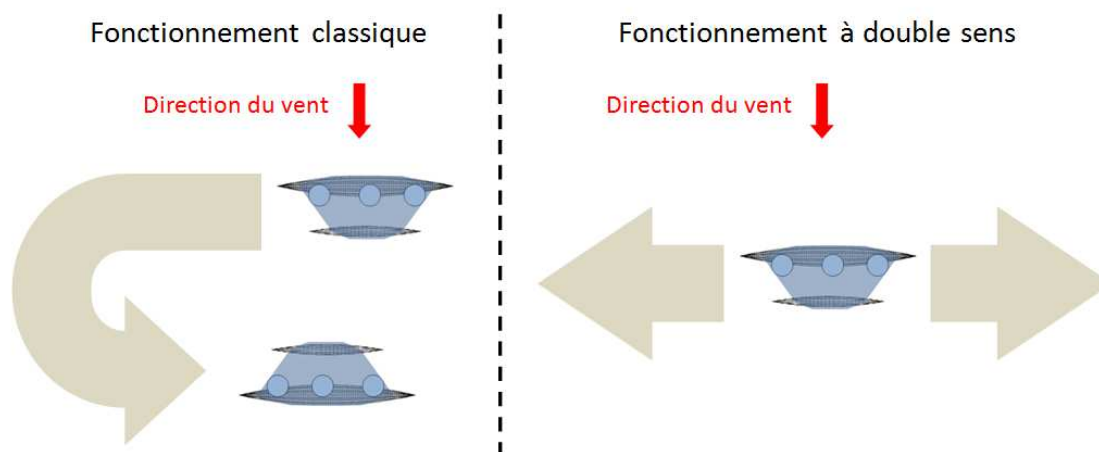


FIGURE III.21 – Fonctionnements possibles d'un voilier à carène non-symétrique.

Dans les résultats on présente aussi bien les performances en tribord amure qu'en bâbord amure en prenant en compte la considération suivante : pour l'hypothèse 1 (fonctionnement classique) les deux amures sont à prendre en compte, pour l'hypothèse 2 (fonctionnement à double sens) seul les résultats relatifs à l'amure tribord sont à prendre en compte.

Puissance nette produite On réalise une courbe polaire de la puissance nette produite III.22. La lecture de la courbe polaire se fait comme suit.

L'angle indiqué (TWA) correspond à l'angle du vent réel par rapport à la direction d'avance du navire (0° navire face au vent, $+90^\circ$ navire vent de travers et 180° navire vent arrière). Le rayon indiqué (P_{net}) correspond à la valeur étudiée (ici la puissance nette produite). Chaque couleur correspond à une vitesse de vent réel (TWS) indiquée dans la légende.

La partie gauche de la courbe polaire correspond à l'amure tribord du navire (le vent vient de la droite et le flotteur bâbord est sous le vent). C'est l'allure la plus performante de cette carène. On observe en tout point une puissance produite supérieure à la puissance produite par le navire de référence. La plage d'angles de vent où le navire atteint la puissance nominale est plus étendue (de 80° à 110° pour une vitesse de vent de 12 m/s et de 67° à 127° pour une vitesse de vent de 14 m/s).

La partie droite de la courbe correspond à l'amure bâbord du navire (le vent vient de la gauche et le flotteur bâbord est au vent). Le navire est moins performant sur cette amure. Pour les vitesses de vent faible (moins de 10 m/s), la puissance produite est égale ou légèrement supérieur à la puissance produite par le navire de référence. Pour les vitesses de vent élevées le navire est plus performant que la référence sur les allures portantes (TWA supérieur à 100°) et moins performant que la référence contre le vent (TWA inférieur à 100°). Pour l'angle remarquable $TWA = 90^\circ$ (vent de travers), le navire est globalement plus performant que le navire de référence (puissance produite supérieure pour les vitesse de vent inférieures à 12 m/s , puissance nominale atteinte à 12 m/s).

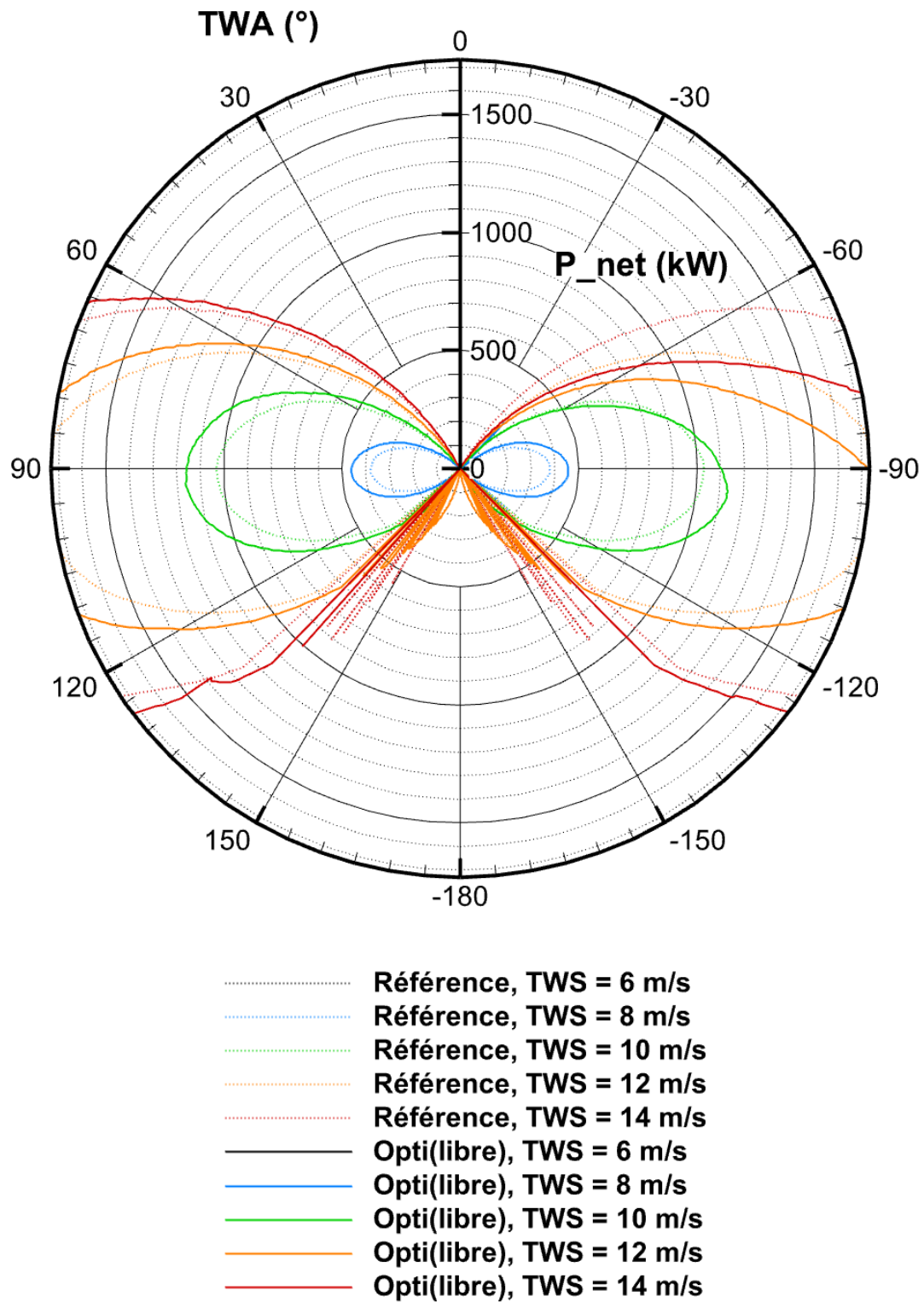


FIGURE III.22 – Courbe polaire de la puissance nette (meilleur individu).

On trace également la puissance produite en fonction de la vitesse du vent pour l'angle particulier $TWA = 90^\circ$ sur la figure III.23. On trouve sur ce graphique la puissance produite par la référence et pour le navire optimisé suivant les deux amures (tribord et bâbord). On retrouve les observations réalisées sur la courbe polaire. Pour les deux amures la puissance produite par le navire optimisé est supérieure. Cependant sur l'amure la moins favorable (bâbord amure) et les vitesses de vent élevées (de 10 à 12 m/s), l'écart avec la référence est plus réduit. Sur l'amure favorable, la puissance nominale est atteinte dès 11,5 m/s (contre 12 m/s pour la référence).

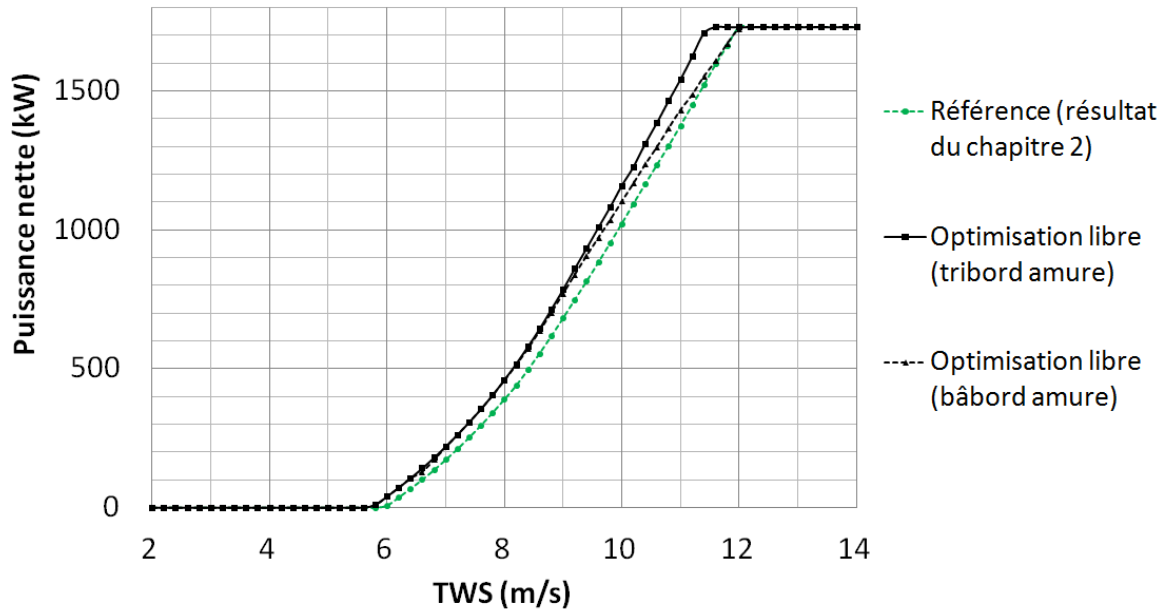


FIGURE III.23 – Puissance nette comparée en fonction de la vitesse du vent réel (TWS).

III.2.5 Interprétation des résultats

Comme l'optimisation a été réalisée avec un seul objectif (la puissance produite), il n'a pas été obtenu de courbes montrant deux objectifs ou caractéristiques du navire (courbes de type front de Pareto). On peut néanmoins tracer ce type de courbes mais il est à noter qu'on y observera une plus grande densité de résultats proches de l'objectif (puissance nette élevée) que loin de l'objectif (puissance nette faible). Les paragraphes suivants présentent ainsi plusieurs caractéristiques remarquables du voilier hydro-éolien.

III.2.5.1 Répartition des volumes immergés

Comme vu dans la description de ce design, le meilleur résultat obtenu pour l'optimisation libre est une carène fortement dissymétrique avec une coque principale à tribord (c'est-à-dire au vent dans la configuration étudiée). Afin d'étudier l'influence de la répartition du volume immergé entre les coques, on utilise le rapport de volume R_V défini précédemment (voir partie III.1.4). La figure III.24 indique la puissance nette obtenue en fonction de R_V . La ligne pointillée rouge indique une estimation du front des puissance maximales. On note à nouveau les trois valeurs remarquables : $R_V = 1$ seule la coque tribord est immergée au repos, $R_V = 0,5$ la carène est symétrique, $R_V = 0$ seule la coque bâbord est immergée au repos.

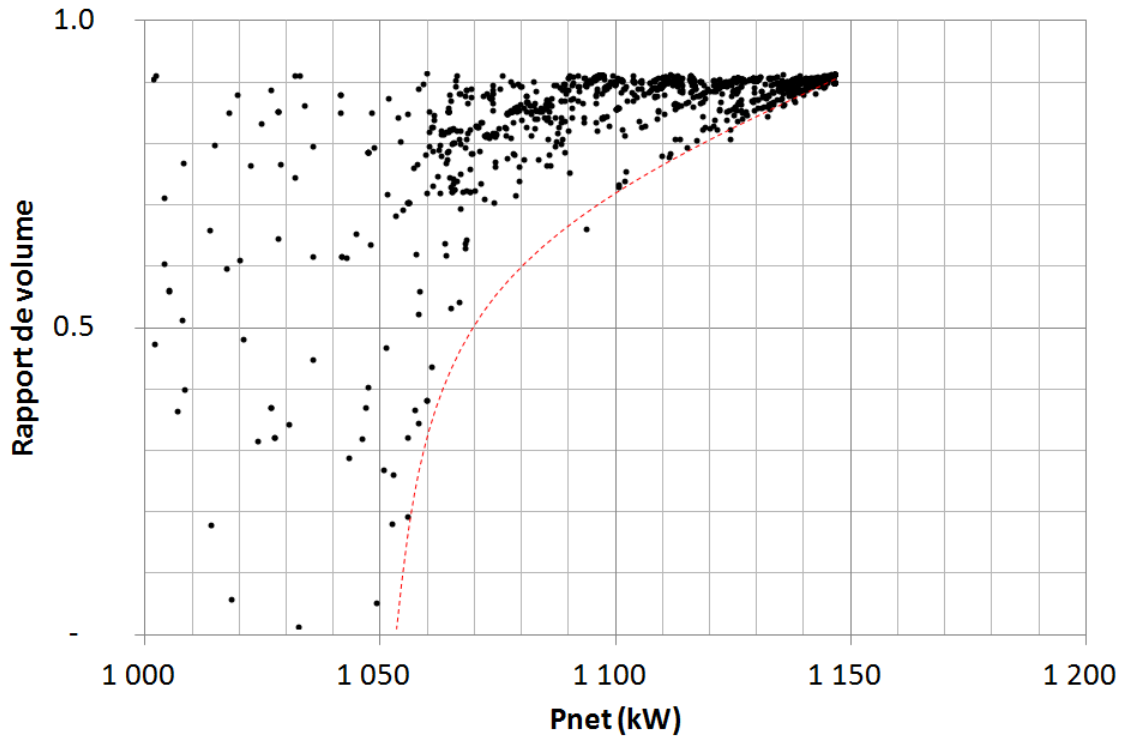


FIGURE III.24 – Rapport de volume en fonction de la puissance nette.

Les puissances maximales sont obtenues pour des valeurs de R_V autour de 0,9 comme c'est le cas du meilleur design de cette optimisation. Au delà de 0,9 la puissance produite chute très nettement jusqu'à 0. Il y a également dans cette zone une chute de la vitesse de rotation des rotors représentée par le rapport de vitesse des rotors sur la figure III.25. Cet élément est représentatif d'une stabilité du navire insuffisante (c'est-à-dire un moment de redressement trop faible). En effet, lorsque la stabilité de la carène est faible, le rapport de vitesse à l'équilibre est diminué afin de maintenir un faible angle de gîte (contrainte imposée dans la résolution de l'équilibre du navire). Cela engendre une diminution de la force propulsive et donc de la puissance produite. Au delà de $R_V = 0,9$, la stabilité du navire est donc incertaine. A noter tout de même, qu'un écartement entre les coques suffisant peut générer, malgré un très faible volume du flotteur sous le vent, un moment de redressement suffisant. L'évolution de la puissance en fonction de R_V est moins marquée de 0 à 0,6. Pour $R_V = 0,5$, on retrouve une puissance produite proche du résultat de l'optimisation symétrique (1,06 MW). La faible densité de points dans cette zone est toutefois source d'erreurs d'interprétation.

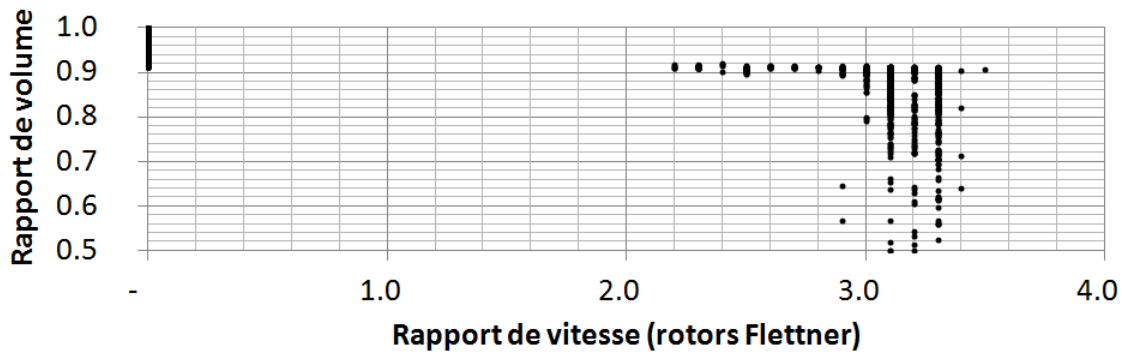
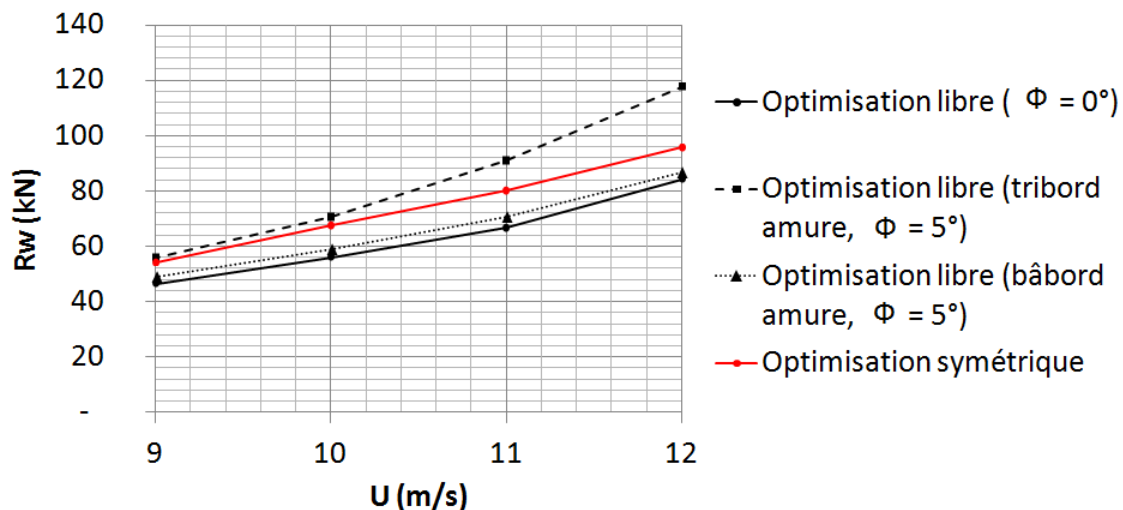


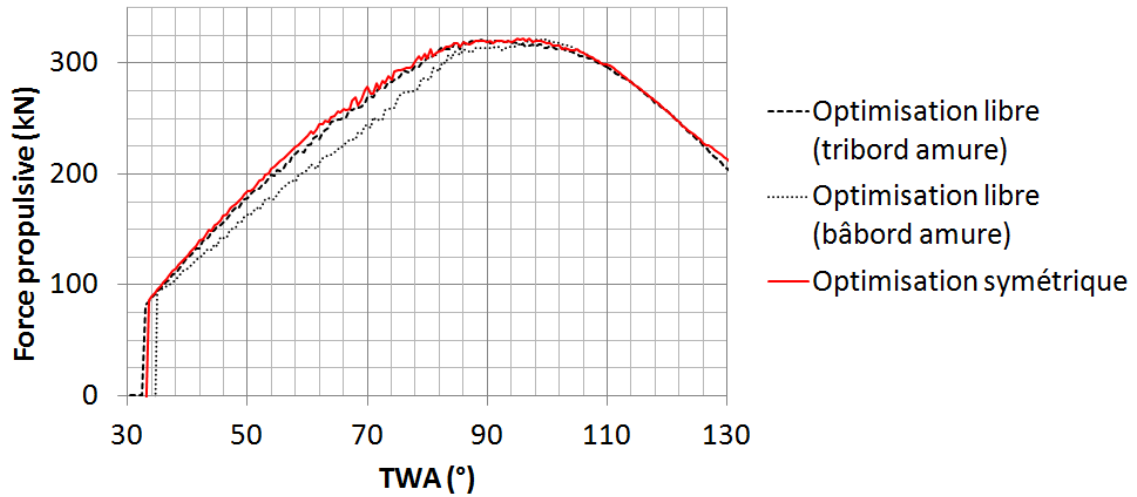
FIGURE III.25 – Rapport de volume en fonction du rapport de vitesse des rotors.

III.2.5.2 Caractérisation des carènes

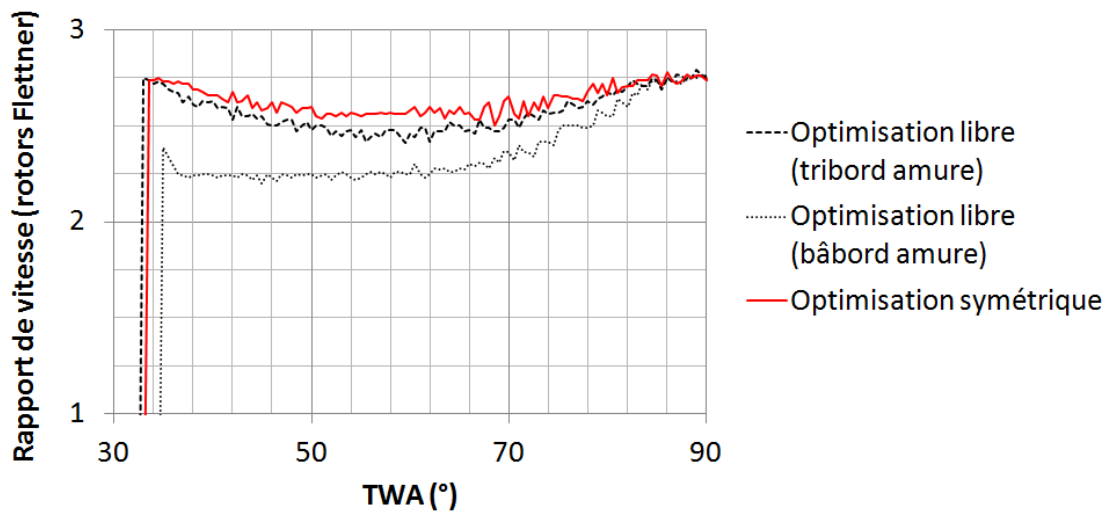
Deux éléments sont importants pour caractériser les carènes du voilier hydro-éolien : la résistance à l'avancement (qui dépend de la vitesse d'avance U et de l'angle de gîte ϕ) et la stabilité (qui permet aux rotors de produire la force propulsive suffisante).

FIGURE III.26 – Résistance à l'avancement de la carène non-symétrique R_w en fonction de l'angle de gîte ϕ et de la vitesse d'avance U .

On étudie les différences de résistance à l'avancement des carènes issues de l'optimisation symétrique et de l'optimisation libre (les deux meilleurs résultats) (voir figure II.23). Pour les deux carènes la surface mouillée a une grande influence sur la résistance à l'avancement car la résistance visqueuse est majoritaire (environ 85% de la résistance totale). Pour la carène issue de l'optimisation symétrique l'angle de gîte n'a pas d'influence sur sa résistance à l'avancement. Pour la carène issue de l'optimisation libre, la résistance à l'avancement est nettement plus faible au repos ou gîté sur bâbord amure que sur tribord amure (sur bâbord amure le flotteur tend à sortir de l'eau sous l'action de la gîte, alors que sur tribord amure celui-ci s'enfonce dans l'eau). Ainsi, la performance de cette carène en tribord amure nécessite de maintenir un angle de gîte faible.



(a)



(b)

FIGURE III.27 – Force propulsive et rapport de vitesse des rotors Flettner en fonction de l'angle du vent réel (TWA) et avec une vitesse de vent de 12 m/s.

Ce graphique laisse supposer que la carène non-symétrique obtient de meilleures performances en bâbord amure ce qui n'est pas le cas. En effet, la stabilité n'est pas suffisante sur ce bord. Le moment de redressement de la carène n'a pas été extrait des résultats et c'est pourquoi on a recouru ici à une méthode indirecte pour étudier la stabilité du navire. La figure III.27a montre que la force propulsive développée par les rotors Flettner est plus faible en bâbord amure pour cette carène. Cette courbe a été réalisée pour une vitesse de vent de 12 m/s ce qui correspond aux vitesses de vent où la carène placée en bâbord amure obtient une puissance produite plus faible. La baisse de force propulsive est liée à la diminution de la vitesse de rotation des rotors Flettner qui est calculée en fonction de la condition de stabilité du navire (voir figure III.27b qui indique le rapport de vitesse des rotors en fonction de l'angle du vent réel).

Le manque de stabilité de la carène pourrait être corrigé en augmentant l'écartement des coques. Au sein de l'optimisation cette solution n'a pas été privilégiée car la puissance produite n'a été évaluée que sur un bord. On aurait pu obtenir des résultats différents en définissant comme critère d'optimisation la moyenne de la puissance produite sur les deux amures (vent venant de la droite et vent venant de la gauche). Cette méthode d'évaluation n'a pas été retenue car elle double le temps d'évaluation de chaque design (on doit calculer 2 fois par design la puissance nette produite). Il aurait été également intéressant, pour compléter l'étude de cette carène de réaliser une comparaison de son comportement en bâbord amure en fonction de différentes valeurs de l'écartement (paramètre *Inter*).

Pour les angles de vent supérieurs à 90° (allures portantes), la vitesse du vent apparent tend à diminuer et la condition de stabilité du navire avec la force propulsive maximale est moins sévère. Ainsi la carène non symétrique en bâbord amure obtient de bons résultats sur les angles de vent de 90 à 130° (résultats très proches de ceux obtenus en tribord amure).

III.2.5.3 Bilan énergétique du navire

On réalise le bilan énergétique du navire. On prend comme point de départ la force propulsive F_{prop} qui permet au navire de se déplacer à la vitesse U . Les pertes énergétiques sont ensuite dues aux éléments suivants : résistance à l'avancement de la carène, rendement électrique de la turbine, consommation des rotors Flettner, rendement de l'électrolyse, consommation de la compression pour le stockage, facteur de charge annuel du navire. Le résultat en fin de chaîne énergétique est la production annuelle du navire. On présente le bilan à la puissance nominale III.28a et à la vitesse de vent moyen de 10 m/s III.28b.

La production nominale hebdomadaire est en moyenne de 4 t d'hydrogène par semaine (le maximum étant fixé à 5 t). Cela correspond à une production annuelle de 208 t. La puissance nominale du navire est atteinte à partir d'une vitesse de vent de 12 m/s. Avec un vent de 10 m/s, la production hebdomadaire est de 2,66 t et la production annuelle de 138 t. ainsi, on observe la nette différence de production en fonction de la qualité de la ressource éolienne.

On remarque que la perte générée par la résistance de la carène est assez faible (environ 30% pour la plupart des bonnes configurations évaluées). La consommation des rotors ici de 270 kW est importante. Elle est toutefois surévaluée car on a considéré ici la consommation maximum comme la consommation moyenne.

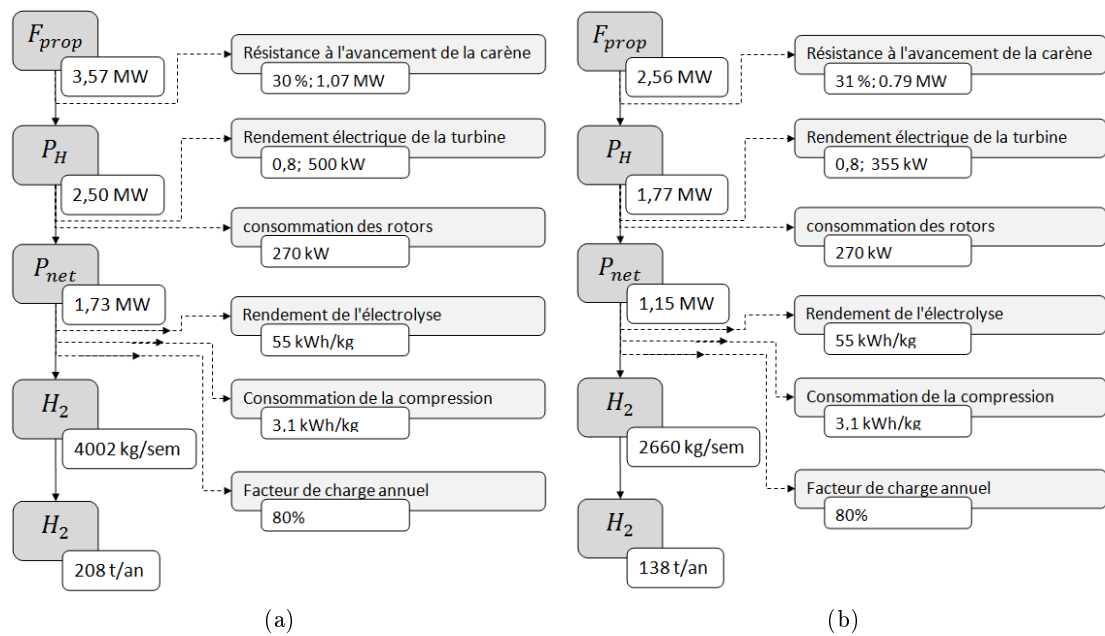


FIGURE III.28 – Bilan énergétique du navire à la puissance nominale ($P_{net} = 1,73MW$) et TWS = 10 m/s ($P_{net} = 1,15MW$).

III.3 Conclusion du chapitre

La méthode d'optimisation présentée dans la première partie de ce chapitre a été appliquée sur la forme de carène du navire de production d'hydrogène. Deux optimisations ont été réalisées, l'une sur des carènes exclusivement symétriques et l'autre sur des carènes plus variées, symétriques ou non. La figure III.29 présente sur un seul graphique le résultat de ces deux optimisations (puissance nette obtenue par tout les individus évalués).

L'optimisation sur carènes symétriques est plus simple car le nombre de paramètres est réduit (4 paramètres). L'optimisation converge rapidement vers une solution pertinente. Le résultat final pour la condition de vent étudiée (vent de travers de 10 m/s) est de 1,07 MW soit 4,9% de plus que le navire de référence (navire utilisé dans l'étude de cas du chapitre 2). Ce gain est faible compte tenu des hypothèses de la modélisation.

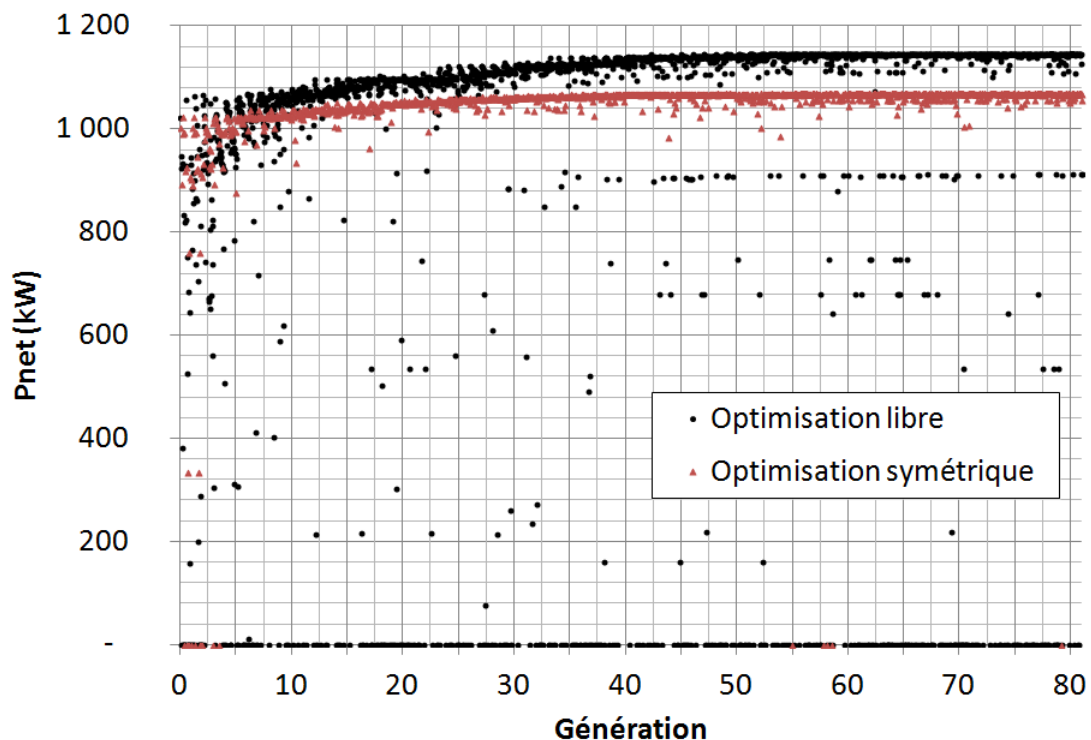


FIGURE III.29 – Comparaison de la puissance nette évaluée en configuration libre et symétrique.

L'optimisation sans restriction de symétrie est réalisée avec un nombre de paramètres plus important (8 paramètres au lieu de 4). Cela permet une diversité plus grande des formes de carènes générées. A cause de cette plus grande diversité, les résultats de puissance produite sont plus variables et le nombre de cas ne respectant pas les contraintes imposées est plus important. On observe dans l'ensemble, une plus grande dispersion des résultats. Le temps de calcul est également plus long (environ 2 fois plus que pour l'optimisation symétrique). La meilleure carène proposée par l'optimisation libre produit 1,15 MW dans la condition de vent étudiée (vent de travers de 10 m/s). C'est 12,4% de plus que la référence.

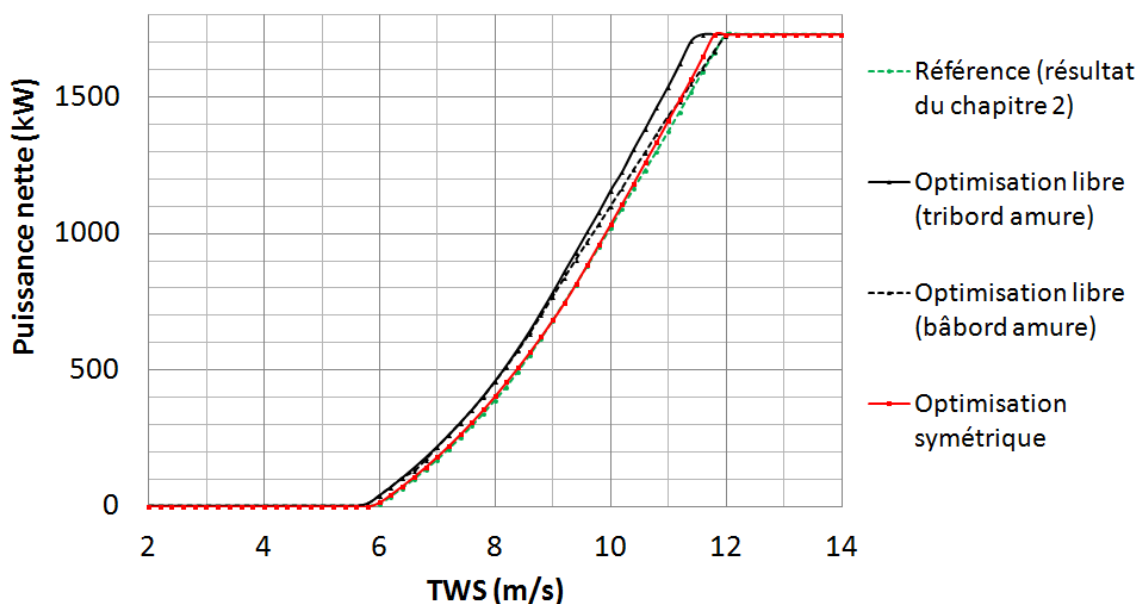


FIGURE III.30 – Puissance nette comparée en fonction de la vitesse du vent réel.

Pour une carène non symétrique, deux fonctionnements sont possibles. Un fonctionnement classique du navire, avec des performances différentes sur chaque amure (si le vent vient de la droite ou de la gauche du navire, il ne présente pas les mêmes caractéristiques). Un fonctionnement à double sens avec un navire capable de naviguer aussi bien en avant qu'en arrière. Dans ce fonctionnement le navire est toujours sur la même amure.

La figure III.30 montre la puissance produite des différents résultats en fonction de la vitesse du vent réel. Les courbes polaires complètes sont également indiquées en fin de chapitre (voir figure III.31). La meilleure carène obtenue est fortement dissymétrique et présente tel un prao une coque principale et un petit flotteur sur le côté. Cette carène obtient de bonnes performances lorsque le flotteur est sous le vent (stabilité suffisante et faible résistance à l'avancement). Lorsque le flotteur est au vent cependant la stabilité est insuffisante pour certaines conditions de vent étudiées. Cette carène est adaptée pour un fonctionnement à double sens sur tribord amure uniquement. Si l'on préfère un fonctionnement classique, d'autres formes de carènes peuvent être adaptées comme par exemple un trimaran avec une grande coque et un petit flotteur de chaque côté. Cette forme aura l'avantage de disposer de performances et d'une stabilité proches de celles observées en tribord amure pour la carène non symétrique.

La puissance nominale est obtenue avec la meilleure carène à partir d'une vitesse moyenne du vent de 11,5 m/s. A cette puissance la production hebdomadaire du voilier hydro-éolien envisagé est de 4 t d'hydrogène par semaine soit 208 t par an. Avec une vitesse de vent de 10 m/s seulement, la production hebdomadaire est de 2,7 t par semaine ou 138 t par an.

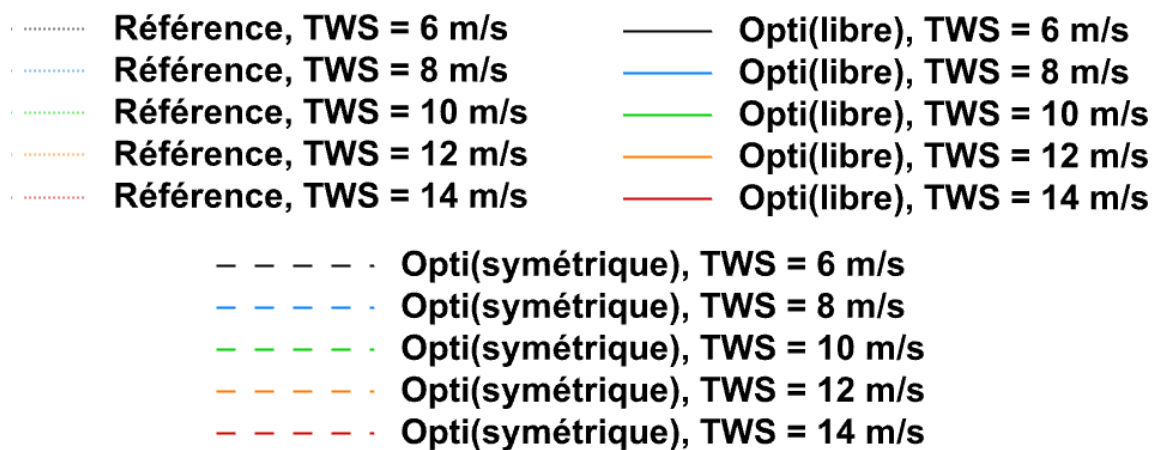
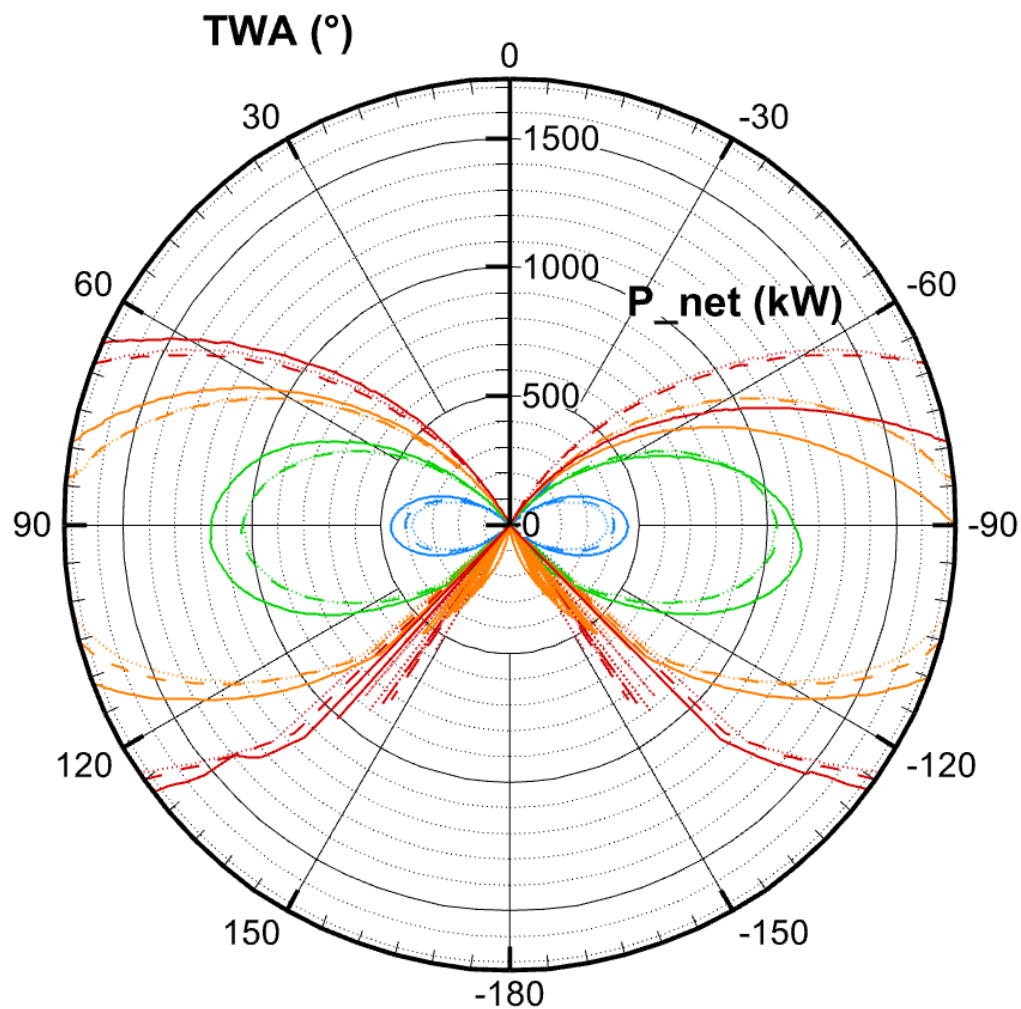


FIGURE III.31 – Courbe polaire comparée (référence, optimisation symétrique, optimisation libre) de la puissance nette.

Conclusion

Choix technologiques des composants du navire

Méthode développée

Le premier chapitre a été consacré à une méthode d'ingénierie système. Celle-ci a permis de développer un outil de choix de solutions technologiques des sous-systèmes du voilier hydro-éolien. Par le développement de cette méthode, les outils suivants sont créés : une description du système étudié et l'exposé de la mission du système (comprenant la description logique du système en sous-systèmes et en sous-sous-systèmes et les description du cycle de vie du système et du projet), la liste des acteurs intervenant dans le projet de système, la liste des fonctions et besoins des intervenants du projet, la liste des exigences permettant au projet d'être viable. Le dernier outil développé (la liste des exigences de viabilité du projet) est particulièrement intéressant et est utilisé pour réaliser les choix de technologie des sous-systèmes.

Choix du système de propulsion du voilier hydro-éolien

Un cas d'application a été réalisé pour le choix de la technologie du système de propulsion éolien du voilier hydro-éolien. Durant cette étude de cas, les deux tâches principales sont les suivantes. Premièrement, il convient de définir des indicateurs de performance en rapport avec les exigences de viabilité. Ceux-ci sont à sélectionner en fonction des systèmes et technologies étudiées. Ils permettent de savoir si une technologie permet au projet de satisfaire les exigences de viabilité définies précédemment. Ensuite il convient de récolter les données nécessaires pour évaluer les indicateurs de performance. Celles-ci peuvent être un résumé des données récoltées sur les systèmes existants ou des études expérimentales disponibles. Il peut être nécessaire de réaliser une évaluation de certaines valeurs (avec une modélisation simple du système étudié). La récolte des données nécessaires est soumise à la grande variabilité des systèmes étudiés (et donc la nécessité de moyennner certaines valeurs et de réaliser des regroupements) et aux qualités variables (suivant les systèmes le nombre et la qualité de données disponibles sont différents). Cette étude de choix technologique du système de propulsion a ainsi permis de réaliser à la fois un choix pertinent sur ce sous-système du navire et un inventaire des solutions disponibles pour ce système.

Modélisation du navire

Résumé du modèle développé

Dans ce chapitre un modèle numérique du navire a été développé. Le modèle numérique repose sur la résolution de l'équation du mouvement en condition quasi-statique. La résistance à l'avancement de différentes carènes est calculée par la méthode des écoulements potentiels. Les choix réalisés pour ces modélisations correspondent à un modèle de basse fidélité et à une résolution numérique rapide qui est particulièrement adaptée pour une optimisation (ce qui est le second objectif du modèle). Grâce au modèle développé une évaluation d'un voilier hydro-éolien de puissance nominale de 2 MW a été réalisée. Le système de propulsion de ce navire a été choisi en fonction des résultats du chapitre 1 (propulsion par rotors Flettner). Le navire étudié est ainsi un catamaran de longueur 80 m et équipé pour sa propulsion de 3 rotors Flettner (de hauteur 30 m et de diamètre 5 m).

Problématique de la performance énergétique

La construction de ce modèle numérique a ainsi permis de répondre à la problématique de la performance énergétique du voilier hydro-éolien. Cela correspond à la production d'énergie du navire et à sa vitesse pour des conditions de vent variées en angle et en vitesse. Ces résultats sont regroupés dans la polaire de puissance produite et dans la polaire de vitesse d'avance. La courbe de la puissance produite en fonction de la vitesse du vent permet également de réaliser un comparatif avec d'autres systèmes de production (par exemple les éoliennes). Ces données peuvent être utilisées pour mettre à jour les simulations de routage météorologique. Cela permettra d'obtenir les performances moyennes du navire sur un temps long (un mois, un an, plusieurs années). Les courbes polaires réalisées permettent également de mieux comprendre les plages de fonctionnement optimales du navire. On connaît effectivement la production électrique en fonction de la vitesse du vent et l'évolution de cette puissance en fonction de l'angle du vent. Cela est utile pour mieux identifier les zones de fonctionnement optimales selon les données météorologiques recueillies (vitesses moyennes du vent, variabilité de la direction du vent). Pour compléter ces données il serait intéressant d'ajouter les performances du navire en fonction de l'état de mer (autre donnée météorologique disponible) ce qui n'a pas été fait dans le modèle numérique développé. Il est possible de faire l'hypothèse de courbes polaires de vitesse et de puissance produite dégradées mais cette solution reste imprécise.

Pistes d'améliorations du modèle

Plusieurs options sont envisageables pour améliorer le modèle numérique. Tout d'abord, il serait intéressant d'inclure tous les degrés de libertés au modèle, en particulier l'angle de dérive qui pour un voilier joue un rôle important. Cet élément fera intervenir les plans anti-dérive et les appendices du navire qui devront alors être implémentés. Pour les appendices, il est possible de les prendre en compte de manière indépendante (en négligeant les interactions entre la coque et les appendices) ou en les intégrant au maillage de la carène (solution plus complexe mais qui permet de prendre en compte les interactions avec la carène).

Pour la modélisation de la partie aérodynamique du navire (les rotors Flettner), on peut ajouter une notion d'interaction entre les rotors (comme dans l'étude (72) illustrée sur la figure III.32b) et d'orientation en fonction de la gîte (comme par exemple l'étude (84) illustrée sur la figure III.32a). Pour réaliser cela on peut créer une surface de réponse des coefficients aérodynamiques des rotors Flettner comme cela a été fait pour les coefficients hydrodynamiques de la carène. Les éléments à prendre en compte ici seront l'angle de gîte du navire ϕ et l'angle du vent apparent AWA . Le calcul de ces coefficients aérodynamiques (en fonction de l'espacement des rotors, de leur diamètre, de leur vitesse de rotation) nécessite une simulation aérodynamique ou des résultats expérimentaux adaptés. Dans le cadre de l'ajout d'une simulation aérodynamique, cela augmentera nettement le temps de calcul.

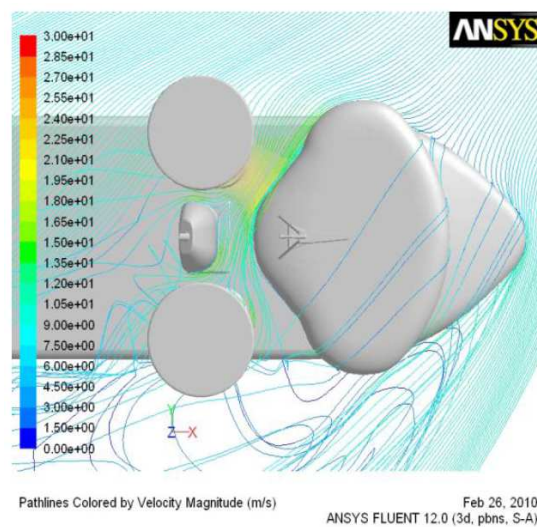
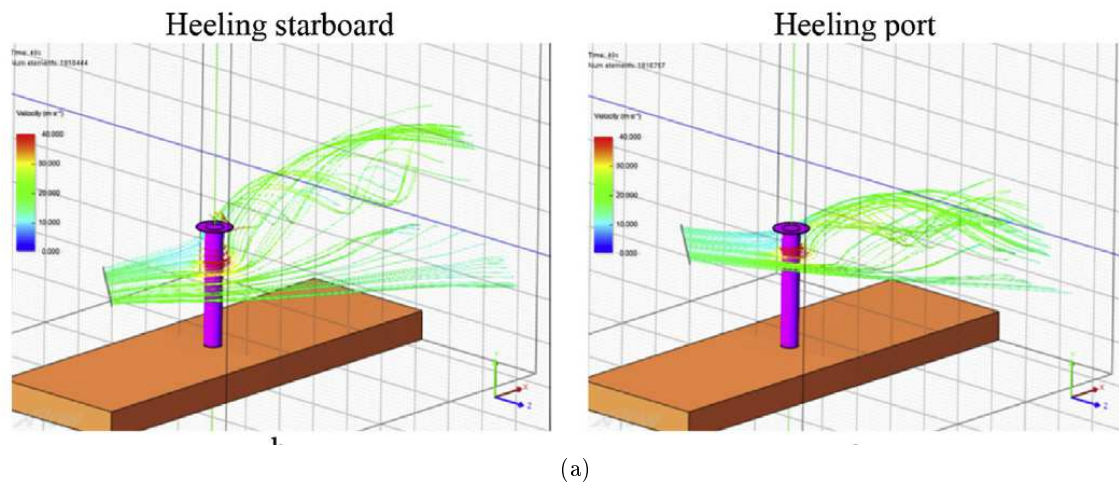


FIGURE III.32 – a) Évaluation des performances des rotors Flettner suivant différents angles de gîte (84). b) Étude de l'interaction aérodynamique entre plusieurs rotors et des éléments du navire (72).

Enfin, il serait intéressant de pouvoir placer le modèle dans des conditions météorologiques plus réalistes. L'ajout de l'état de mer, éventuellement dans un premier temps comme une houle régulière serait un élément pertinent.

Chacune des remarques développées ici aura un impact important sur le temps de calcul nécessaire à la résolution du modèle. Dans un sens, le modèle numérique développé a été bridé afin de se conformer aux contraintes de l'optimisation (temps de calcul restreint, automatisation des maillages, etc.). Dans les futurs développements il semble pertinent, si le temps d'optimisation n'est pas réduit, de distinguer deux modèles. Un modèle à plus haute fidélité, qui permet de mieux prendre en compte la physique du navire mais dont le temps de résolution est plus long et un modèle destiné à l'optimisation de moins bonne fidélité mais qui permet de tester des hypothèses de conception (nombre de coques du navire, nombre ou placement des rotors, etc.).

Optimisation de la forme de carène

Discussion sur l'optimisation

La mise en place du modèle numérique à résolution rapide a permis d'évaluer un grand nombre de carènes différentes (en tout 3840 évaluations ont été réalisées). Les optimisations ont été réalisées sur 80 générations. On remarque que les mêmes résultats auraient pu être obtenus avec seulement 40 générations (soit l'économie de la moitié du temps de calcul). Cette imprécision sur le nombre de génération nécessaire à la convergence est un des défauts du paramétrage de l'algorithme tel qu'il a été réalisé (paramètres standards sans ajustement au problème étudié) car on connaît peu le comportement de l'algorithme avant de réaliser l'optimisation.

L'optimisation fonctionne cependant correctement et donne de bons résultats. On observe en effet la convergence attendue. L'évaluation de chaque design est suffisamment rapide pour que l'optimisation puisse être réalisée en une dizaine à une vingtaine de jours (avec un seul processeur). On obtient une puissance produite significativement supérieure signe que le choix des paramètres et de leurs plages d'évolution ont permis une amélioration de la forme de carène. Pour améliorer l'optimisation il faut travailler d'une part sur l'amélioration du modèle (qui a été discutée précédemment) et d'autre part sur la réduction du temps de calcul (discutée dans le paragraphe suivant).

Réduction du temps de calcul

Le temps d'évaluation d'un design est autour de 30 mn avec un seul processeur. Si l'on souhaite faire évoluer cette optimisation (par le biais de l'amélioration du modèle, de l'augmentation du nombre de paramètres étudiés ou de la mise en place de plusieurs objectifs) il sera nécessaire d'adapter sa mise en place. Une solution pertinente est de la réaliser sur plusieurs cœurs simultanément. Cette solution est particulièrement adaptée à un algorithme génétique car on peut évaluer simultanément tous les designs d'une même génération. En prenant comme exemple l'optimisation à 8 paramètres, cela permet de diviser par 32 le temps de résolution de l'optimisation (32 étant le nombre d'individus par génération, qui vaut 4 fois le nombre de paramètres). L'architecture du calcul avec l'utilisation de surfaces de réponse peut permettre d'aller plus loin. En effet, la surface de réponse de la résistance résiduelle de la carène (qui est l'élément le plus long à calculer) comporte 36 points qui peuvent être évalués en même temps. Ces deux méthodes (calcul simultané de plusieurs designs, calcul simultané des points des surfaces de réponse) peuvent permettre une très nette réduction du temps de calcul de l'optimisation.

Autres formes de carènes envisagées

Les résultats de l'optimisation ont montré une nette augmentation de l'objectif (la puissance nette produite) pour les formes de carènes non symétriques alors que les carènes symétriques obtiennent des résultats proches de ceux obtenus auparavant. Cependant la très bonne performance des carènes de type prao (non symétriques) dépend en grande partie de l'amure sur laquelle elles sont placées (vent venant de la droite ou de la gauche). Comme la meilleure carène obtenue doit être utilisée uniquement sur son bord favorable, le mode de fonctionnement le plus adapté est le fonctionnement à double sens (le navire évolue aussi bien vers l'avant que vers l'arrière mais en restant tribord amure comme expliqué précédemment sur la figure III.21).

Si l'on souhaite un navire qui dispose de bonnes caractéristiques sur les deux bords il convient d'adapter la carène. Comme la carène optimale dispose d'une coque principale et d'un petit flotteur, on peut envisager de placer un deuxième flotteur sur l'autre côté passant ainsi d'une carène catamaran à une carène trimaran. La figure III.33 montre une représentation de ce que pourrait être une telle carène trimaran. Par rapport au catamaran, le trimaran dispose d'un flotteur de plus et d'une surface de pont et d'une structure plus étendues. Son centre de gravité sera au centre du navire alors qu'il était déporté vers le flotteur pour le catamaran.

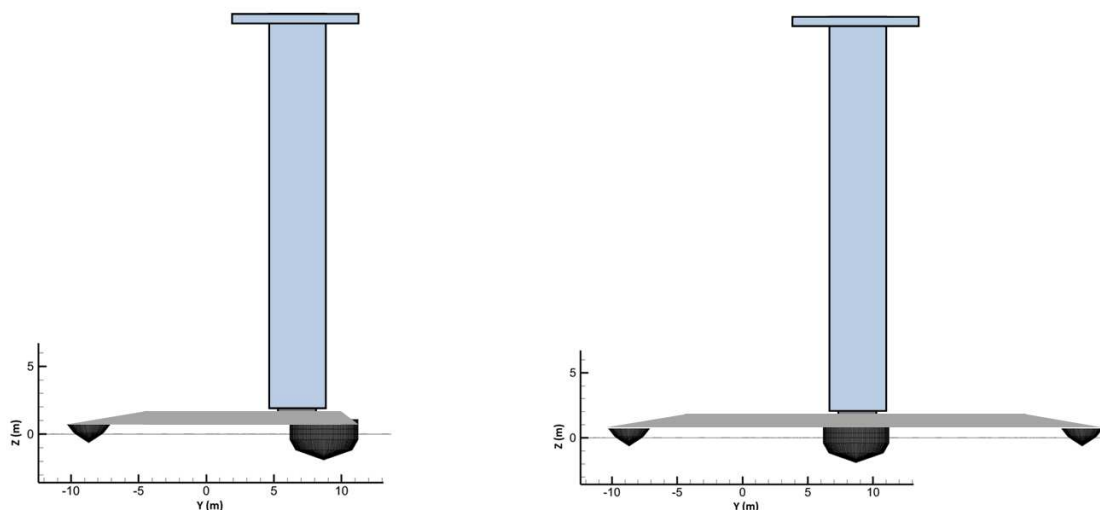


FIGURE III.33 – Représentation du voilier hydro-éolien avec la carène de prao optimisée (à gauche) et avec une carène trimaran (à droite).

Les performances hydrodynamiques du trimaran sont supposées proches de celles du catamaran. En effet, avec un angle de gîte faible il est attendu que le flotteur au vent ne soit plus dans l'eau et l'on se retrouve ainsi d'un point de vue hydrodynamique, dans une configuration similaire au catamaran. Cependant, la plus grande taille de cette carène doit être prise en compte pour pouvoir comparer correctement les deux carènes. Pour cela il faudra détailler la masse de la carène (afin de quantifier l'écart de la masse des structures et des coques) et inclure une estimation du coût de la carène (en fonction du nombre de coques, de sa masse, de la surface de matériaux nécessaires).

Perspectives générales

Durant cette thèse il m'a été donné l'occasion de travailler sur un nouveau concept de production d'énergie en mer : le voilier hydro-éolien de production d'hydrogène. Ce concept vise à relever les défis de la transition énergétique en proposant une alternative renouvelable de production d'hydrogène. J'ai abordé la question de la capacité de production d'énergie de cette solution en prenant en compte des hypothèses généralement défavorables (sur la position du centre de gravité, le rendement des sous-systèmes, la consommation des rotors Flettner, etc.). Cette approche permet de rendre pertinents les résultats avancés malgré les sources d'incertitude du modèle.

L'étude a montré que le navire est capable d'une production d'énergie de l'ordre du mégawatt dans des vents de 8 à 12 m/s. Ces vitesses de vent correspondent tout à fait aux régimes de vent disponibles en Europe et en Atlantique Nord. La figure III.34 issue de données QuikSCAT (120) montre par exemple la répartition annuelle des vitesses de vent en mer. On remarque que pour l'Atlantique nord les vitesses moyennes sont de 8 à 11 m/s.

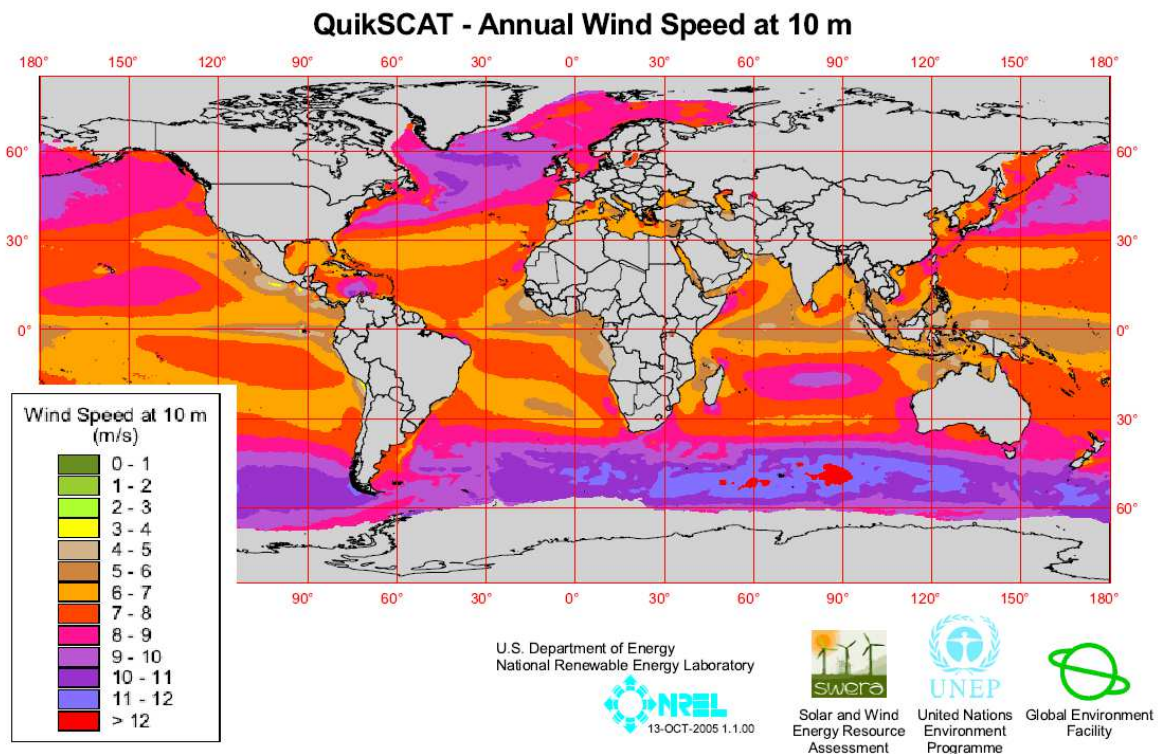


FIGURE III.34 – Vitesse moyenne des vents en mer à 10 m sur la période 2000 - 2004 (données QuikSCAT (120)) .

On peut extrapoler ces résultats pour mieux appréhender la capacité d'un tel système de production comprenant 10 à 100 navires de ce type. La figure III.35 rappelle la capacité de production du navire (pour un vent moyen de 12 m/s) et son équivalent en production annuelle d'hydrogène. On estime ainsi la production annuelle d'une flotte de 10 navires à environ 2000 t d'hydrogène par an et à 20 000 t d'hydrogène par an pour un système de 100 navires. Compte tenu également de l'immensité de la zone de production disponible, cela fait de ce système de production une alternative capable de produire l'hydrogène nécessaire au développement à grande échelle de cette source d'énergie renouvelable. Pour développer plus avant ce système de production des études sont encore nécessaires. Les étapes suivantes du développement devront comprendre une définition plus précise du navire afin d'une part de réaliser une estimation de son coût et le développement d'un modèle numérique de plus haute fidélité.

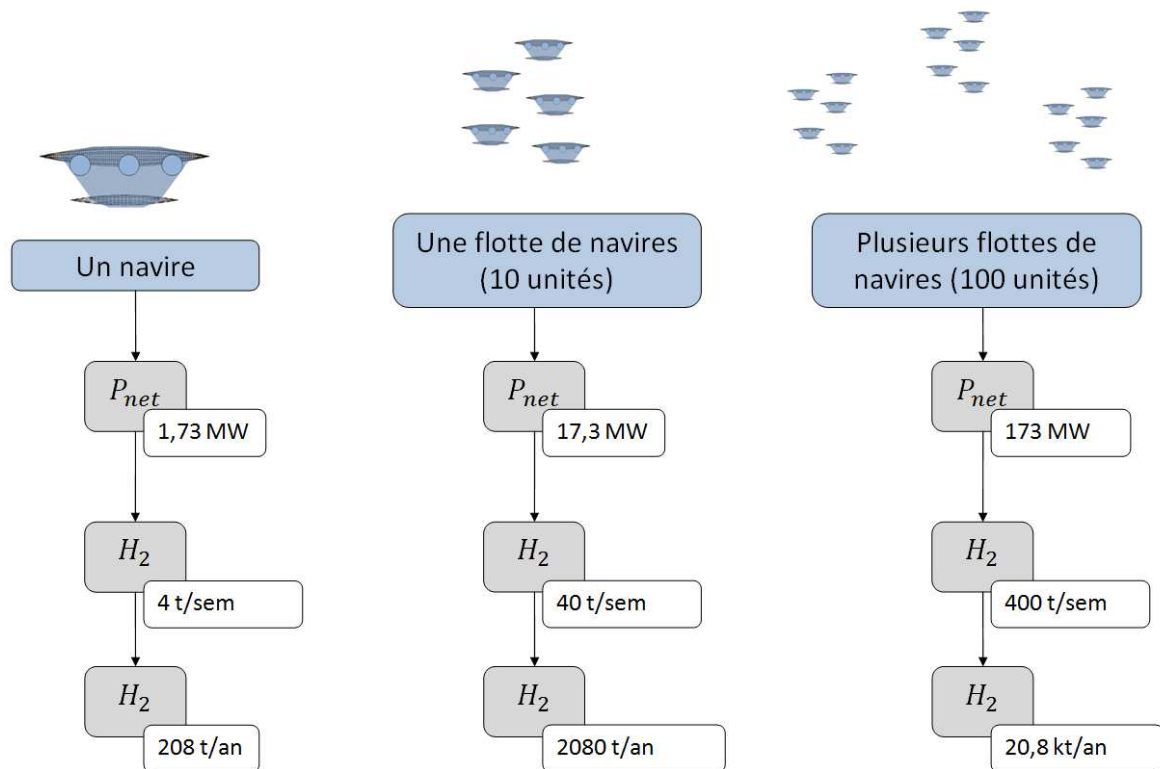


FIGURE III.35 – Estimation de la production annuelle d'un navire, d'une flotte de 10 navires et de plusieurs flottes de navires (100 navires).

Bibliographie

- [1] Changements climatiques 2014, rapport de synthèse, G., *Rapport du groupe d'experts inter-gouvernemental sur l'évolution du climat*, 2014.
- [2] Global potential for wind-generated electricity, Lu X., McElroy M.B. and Kiviluma J., *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009.
- [3] Current status and future trends of offshore wind power in Europe, Soares-Ramos E.P., de Oliveira Assis L. et al., *Journal of Energy*, 2020.
- [4] Key trends and statistics 2019, W., *Offshore wind in Europe*, 2019.
- [5] MERRA : NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications, Rienecker M., Suarez M. et al., *Journal of Climate*, 2011.
- [6] Comparison of the capacity factor of stationary wind turbines and weather-routed energy ships in the far-offshore, Abd Jamil R., Chaigneau A. et al., *Presentation in EERA DeepWind 2019, 16th Deep Sea Offshore Wind R&D conference*, 2019.
- [7] Process of converting wind energy to elemental hydrogen and apparatus therefor, Salomon R.E., *United States Patent*, 1982.
- [8] Wind power generation with a prawning on ships, a proposal, Kim J. and Park C., *Journal of Energy*, 2010.
- [9] Economy of hydrogen production by parafoil-pulled ships, Kim J.C. and Park C., *Journal of Energy Power Sources*, 2014.
- [10] Hydrogen generation sailing ship, conceptual design and feasibility study, Ouchi K. and Henzie J., *Proc. Of IEEE OCEANS2017 conference, Aberdeen, UK*, 2017.
- [11] Preliminary design of a wind driven vessel dedicated to hydrogen production, Gilloteaux J.C. and Babarit A., *Proceedings of the ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, 2017.
- [12] Progress in electrical energy storage system : A critical review, Chen H., Cong T.N. et al., *Progress in Natural Science*, 2009.
- [13] Experimental study on the sailing performance of a VLMOS for wind powerplant, Takagi K., Hiramatsu T. et al., 2009.
- [14] Optimum routing of a sailing wind farm, Tsujimoto M., Uehiro T. et al., *Journal of marine science and technology*, 2009.
- [15] Innovative Autonomously-Driven Offshore Wind Turbines : a prefeasibility analysis, Beseler X.M., *M Sc Thesis*, 2019.

- [16] Techno-economic feasibility of fleets of far offshore hydrogen-producing wind energy converters, Babarit A., Gilloteaux J.C. et al., *Hydrogen Energy*, 2018.
- [17] Analytical method towards an optimal energetic and economical wind-energy converter, Pelz P.F., Holl M. and Platzner M., *Journal of Energy*, 2016.
- [18] New methods for new systems - how to find the techno-economically optimal hydrogen conversion system, Holl M., Rausch L. and Pelz P., *Hydrogen energy*, 2017.
- [19] Economic Strategies for the Development of a Far Offshore Wind Energy Converting Ship, Raffray M., *Internship Report at Sciences Sorbonne Université*, 2018.
- [20] Systems engineering practice, Faulconbridge R.I. and Ryan M.J., *Argos Press*, 2018.
- [21] Stakeholder requirements for commercially successful wave energy converter farms, Babarit A., Bull D. et al., *Renewable Energy*, 2017.
- [22] Systems and software engineering - system life cycle process, ISO/IEC/IEEE 15288 :2015 ., 2015.
- [23] Experimental and numerical study of the resistance component interactions of catamarans, Jamaluddin A., I. et al., *J. engineering for the maritime environment*, 2012.
- [24] IEC 61400-3 Wind turbines - Part 3 : Design requirements for offshore wind turbines, I., 2019.
- [25] Shape Sensing Monitoring System Based on Fiber-Optic Strain Measurements : Laboratory Tests, Ferreira P. and Caetano E., *Experimental techniques*, 2017.
- [26] Sail assist Developments 1979-1985, Bergeson L., *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 1985.
- [27] Systematic variation of wind assisted ship designs, Marin ., *Blue Week*, 2018.
- [28] Ecoliner - future design in progress, Dykstra ., *Dykstra presentation*,, 2013.
- [29] The use of fibre optic strain monitoring systems in the design, testing and performance monitoring of the novel freestanding Dynarigs on an 87 m SuperYacht by Perini Navi, design by G Dijkstra, Roberts D. and Dijkstra G., *The International HISWA Symposium on Yacht Design and Yacht Construction*, 2004.
- [30] The Maltese Falcon : the realisation, Perkins T., Dijkstra G. and Roberts D., *The International HISWA Symposium on Yacht Design and Yacht Construction*, 2004.
- [31] AeroRig - The rig of the future, McDonald N. and Roberts D., *The International HISWA Symposium on Yacht Design and Yacht Construction*, 1996.
- [32] Sail assist developpements 1979-1985, Bergeson L. and Greenwald C.K., *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1985.
- [33] Comparison of wind tunnel and full-scale aerodynamic sail force measurements, Hansen H., Jackson P. and Hochkirch K., *High performance yacht design conference*, 2002.
- [34] Changes and development to sail aerodynamics in the ORC international handicap rule, Cloughton A., Fossati F. et al., *20th International Symposium on Yacht Design and Yacht Construction*, 2008.
- [35] Recent advances in sailing yacht aerodynamics, Viola I.M., *Applied Mechanics Reviews*, 2013.

-
- [36] Validation of simple aerodynamic model capable to predict the interaction effects occurring between two generic wind propulsion systems, Bordogna G., Fossati F. and Belloli M., *12th International Conference on Hydrodynamics, Netherlands*, 2016.
- [37] A numerical method for the design of ships with wind-assisted propulsion, Ignazio M.V., Sacher M. et al., *Ocean Engineering*, 2015.
- [38] A Prospect of Sail-Assisted Fishing Boats, Yasuo Y., *Proceedings of International Commemorative Symposium, 70th Anniversary of the Japanese Society of Fisheries Science*, 2001.
- [39] Sail-sail and sail-hull interaction effects of hybrid-sail assisted bulk carrier, Fujiwara T., Hearn G.E. et al., *Marine Science and Technology*, 2005.
- [40] Steady sailing performance of a hybrid-sail assisted bulk carrier, Fujiwara T., Hearn G.E. et al., *Marine Science and Technology*, 2005.
- [41] Huge Hard Wing Sails for the Propulsor of Next Generation Sailing Vessel, Ouchi K., Uzawa K. and Kanai A., *Second International Symposium on Marine Propulsors, Hamburg, Germany*, 2011.
- [42] “Wind Challenger” the Next Generation Hybrid Sailing Vessel, Ouchi K., Uzawa K. et al., *Third International Symposium on Marine Propulsorsmp’13, Launceston, Tasmania, Australia*, 2013.
- [43] Analysis of the Conversion of Ocean Wind Power into Hydrogen, Platzer M.F., Lennie M. and Vogt D.M., *World Renewable Energy Conference, Perth, Australia*, 2013.
- [44] The CFD assisted design and experimental testing of a wingsail with high lift devices, Atkins D.W., *Research institute for design manufacture and marketing, University of Salford*, 1996.
- [45] Study of rigid sail aerodynamics, Grassi C., Foresta M. et al., *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects*, 2013.
- [46] A study on the performance of cascade hard sails and sail-equipped vessels, Li Q., Nihei Y. et al., *Ocean Engineering*, 2015.
- [47] Surrogate model based design optimization of multiple wing sails considering interaction effect, Lee H., Jo Y. et al., *Ocean Engineering*, 2016.
- [48] Wind Powered Vessels with Hybrid and Autonomous Technologies, Goh K. and Hansen K.E., *Royal Institute of Naval Architects – Power and Propulsion Alternatives for Ships, Europort Rotterdam*, 2017.
- [49] Ressearch on sail aerodynamics performances and sail-assisted ship stability, He J., Hu Y. and Xue S., *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 2015.
- [50] Airborne wind energy systems : a review of the technologies, Cherubini A., Papini A. et al., *Renewable and sustainable energy reviews*, 2015.
- [51] Control of towing kites for seagoing vessels, Erhard M. and Strauch H., *IEEE Transactions on control systems technology*, 2013.
- [52] Skysails technology information, S., 2008.
- [53] Propulsion de yatchts par kite, S., 2017.
- [54] SkySails tethered kites for ship propulsion and power generation : modeling and system identification, Erhard M., *Talk at IMTEK, University of Freiburg*, 2015.

- [55] Kite and classical rig sailing performance comparison on a one design keel boat, Leloup R., Roncin K. et al., *Ocean Engineering*, 2014.
- [56] Experimental set up for measuring onshore and onboard performances of leading edge inflatable kites - presentation of onshore results, Behrel M., Roncin K. et al., *4th International conference on innovation in high performance sailing yachts, Lorient*, 2017.
- [57] Ship towed by kite in waves : a strongly coupled system, Bigi N., Leroux J. et al., *4th International conference on innovation in high performance sailing yachts, Lorient*, 2017.
- [58] Application of phase averaging method for measuring kite performance : onshore results, Behrel M., Roncin K. et al., *Journal of Sailing technology*, 2018.
- [59] Crosswind kite power, Loyd L.M., *Journal of Energy*, 1980.
- [60] Chapter 1 : Basic Concepts and Physical Foundations, Diehl M., *Airborne Wind Energy*, 2013.
- [61] Airborne wind energy ressource analysis, Bechtle P., Schelbergen M. et al., *Renewable Energy*, 2019.
- [62] Optimization and control of a hybrid kite boat, Fagiano L., Milanese M. and Razza V., *18th World Congress, the International Federation of Automatic Control*, 2011.
- [63] Determination of kite forces using three-dimensional light trajectories for ship propulsion, Dadd G.M., Hudson D.A. and Shenoi R.A., *Renawable Energy*, 2011.
- [64] Kite Dynamics for ship propulsion, Dadd G.M., *Thesis of university of Southampton*, 2013.
- [65] Modelling and control of a tethered kite in dynamic flight, Cadalen B., Griffon F. and Sabatier : Y. Parlier P., *4th International conference on innovation in high performance sailing yachts, Lorient*, 2017.
- [66] Boundary layer transition modelling on leading edge inflatable kite airfoils, Folkersma M., Schmehl R. and Viré A., *Wind Energy*, 2019.
- [67] Test of rotating cylinders, Reid E.G., *Nationnal advisory comitee for aeronautics*, 1924.
- [68] Effect of discs on the air forces on a rotating cylinder, Thom A., *Aeronautical resesearch comittee reports and memoranda*, 1934.
- [69] Back to the Future ? A Re-examination of the Aerodynamics of Flettner-Thom Rotors for Maritime Propulsion, Craft T., Johnson. N. and Launder B., *Flow turbulence combust*, 2014.
- [70] Hypersustentation par cylindre tournant, Cordier S., *3ème journées de l'hydrodynamique, Grenoble*, 1991.
- [71] The use of Flettner rotors in efficient ship design, Pearson D.R., *Influence of EEDI on ship design, London*, 2014.
- [72] Enercon E-Ship 1, a wind-hybrid commercial cargo ship, Enercon ., *4th conference on ship efficiency, Hamburg*, 2013.
- [73] Norspower website, Norsepower ., *www.norsepower.com*, 2019.
- [74] BWEA initiative on wind assisted ship propulsion (WASP), Clayton B., *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1985.

-
- [75] The effects of endplates on a rotating cylinder in crossflow, Badalamenti C. and Prince S.A., *26th Applied aerodynamics conference, Honolulu, Hawaii*, 2008.
- [76] NUMERICAL ANALYSIS OF A ROTATING CYLINDER WITH SPANWISE DISCS, Thouault N., Breitsamter C. et al., *27th International congress of the aeronautical sciences*, 2010.
- [77] Sea-going hardware for the cloud albedo method of reversing global warming, Salter S., Sortino G. and Latham J., *Philosophical transactions of the Royal Society*, 2008.
- [78] a review of the Magnus effect in aeronautics, Seifert J., *Progress in aerospace sciences*, 2012.
- [79] Etude théorique et expérimentale de l'effet "Magnus" destinée à la propulsion éolienne de navires, Charrier B., *Université de Paris VI*, 1979.
- [80] Propulsive power contribution of a kite and a Flettner rotor on selected shipping routes, Traut M., Gilbert P. et al., *Applied Energy*, 2014.
- [81] Techno economic and environmental assessment of flettner rotors for marine propulsion, Talluri L., Nalianda D.K. and Giuliani E., *Ocean Engineering*, 2018.
- [82] A numerical study of flow past a rotating cylinder using a hybrid vortex scheme, Ming C., *Journal of Fluid Mechanics*, 1995.
- [83] Wind-Tunnel Experiments on a Large-Scale Flettner Rotor, Bordogna G., Muggiasca S. et al., *Proceedings of the XV Conference of the Italian Association for Wind Engineering*, 2018.
- [84] Analysis of Flettner rotor ships in beam waves, Copuroglu H.I. and Pesman E., *Ocean Engineering*, 2018.
- [85] Fondation cousteau and windship propulsion, Charrier B., Constans J. et al., *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 1985.
- [86] Numerical prediction for the aerodynamic performance of Turbosailtype wind turbine using a vortex model, Hcini C., Abidi E. et al., *Journal of Energy*, 2016.
- [87] Dispositif à très haute portance pour la propulsion éolienne des navires et autres applications, Cousteau J.Y., *Office européen des brevets*, 1981.
- [88] Experience with sail assisted propulsion : the ALCYONE, Nahon J.C. and Deguy B., 2013.
- [89] Ventifoil developpements, Econowind ., 2018.
- [90] Flow past a wind-assisted ship propulsion device, Low H.T., Luo S.C. and Winoto S.H., *Ocean Engineering*, 1991.
- [91] Simulation numérique de l'écoulement autour d'un profil épais aspiré de type turbovoile, Hcini C., Abidi E. and Kamoun B., *10th International Congress on Renewable Energy and the Environment, Tunisia*, 2016.
- [92] A turbosail profil analysis code based on the panel method, Hcini C., Abidi E. et al., *Journal of energy*, 2017.
- [93] Volume III - Motions in Wavesand Controllability, The Society of Naval Architects . and Marine E., *Principles of Naval Architecture Second Revision*, 1989.
- [94] Das maximum der theoretisch möglichen ausnützung des windes durch windmotoren, Betz A., *Zeitschrift fur das gesamte Turbinewesen*, 1920.

- [95] Final report and recommendations, ITTC ., *26th International Towing Tank Conference*, 2011.
- [96] Analyse et optimisation des performances de carènes élancées en mouvement instationnaire. Application aux bateaux d'aviron, Berton M., *Thèse de l'Ecole Centrale de Nantes*, 2007.
- [97] An investigation into the nature and interdependence of the components of ship resistance, Lackenby H., *Transactions of the royal institute of naval architects.*, 1965.
- [98] Renewable Power-to-Gas : A technological and economic review, Götz M., Lefebvre J. et al., *Renewable Energy*, 2016.
- [99] Study on early business cases for H2 inenergy storage and more broadly power to H2 applications, Chardonnet C., De Vos L. et al., *FCH-JU : Brussels, Belgium 228*, 2017.
- [100] Energy requirements for hydrogen gas compression and liquefaction as related to vehicle storage needs, Gardiner M. and Satyapal S., *DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record*, 2009.
- [101] www.wattandsea.com, WattAndSea ., *Watt And Sea website*, 2020.
- [102] Novel Developments in Alkaline Water Electrolysis, Vogt U.F., Schlupp M. et al., *8th International Symposium Hydrogen and Energy*, 2014.
- [103] Chapter 2 : Selection of main dimensions and calculationof basic ship design value, Papanikolaou A., *Ship Design : methodologiesof preliminary design*, Springer, 2014.
- [104] A systems engineering vision for floatingoffshore wind cost optimization, Barter G.E., Robertson A. and Musial W., *Renewable Energy Focus*, 2020.
- [105] Navire autopropulsé en manoeuvres : simulation numérique et optimisation des performances hydrodynamiques, Jacquin E., *Thèse de l'Ecole Centrale de Nantes*, 2007.
- [106] Self-blending method for hull form modification and optimization, Hong Z.C., Zong Z. et al., *Ocean Engineering*, 2017.
- [107] Evaluation and optimization of trimaran configurations using deep neural network, Dongchi Y., Lu W. et al., *Proceedings of the ASME 2019 38th int. conference on Ocean, Offshore and Artic Engineering*, 2019.
- [108] Contribution à l'optimisation de forme pour des écoulements à forts nombre de Reynlods autour de géométries complexes, Duvingneau R., *Thèse de l'Ecole Centrale de Nantes*, 2002.
- [109] Optimization methods applied to renewable and sustainable energy : A review, Banos R., F.G. Montoya F. et al., *Renewable and sustainable energy review*, 2011.
- [110] Optimisation de la carène d'un voilier de grand voyage, Philibert P., Bonnard H. and Charlou M., 2017.
- [111] Comparison of multi-objective optimization methodologies forengineering applications, Chiandussi G., Codegoneb M. et al., *Computers and Mathematics with Applications*, 2012.
- [112] Hull surface modification fo ship resistance performance optimization based on Delauney triangulation, Chang X., Feng B. et al., *Ocean Engineering*, 2018.
- [113] Multi-objective optimization using genetic algorithms : a tutorial, Konak A., Coit D.W. and Smith A.E., *Reliability engineering and system safety*, 2006.

-
- [114] Multi-objective optimization of micro-electrical discharge machining of nickel-titanium-based shape memory alloy using MOGA-II, Abidia M.H., Al-Ahmaria A.M. et al., *Measurement*, 2018.
- [115] A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm : NSGA-II, Deb K., Pratap A. et al., *IEEE Transactions on evolutionary computation*, 2002.
- [116] Overview of NSGA-II for optimizing machining process parameters, Yusoff Y., Ngadiman M.S. and Zain A.M., *Procedia Engineering*, 2011.
- [117] A NSGA-II and NSGA-III comparison for solving an open shop scheduling problem with resource constraints, Campos Ciro G., Dugardin F. et al., *International Federation of Automatic Control*, 2016.
- [118] Autonomous Search, Eiben A.E. and Smit S.K., *Evolutionary Algorithm Parameters and Methods to Tune Them*, 2011.
- [119] The Rudder, Munroe R.M., *The Rudder*, 1900.
- [120] QuikSCAT annual data from 2000-2004, National Aeronautics . and Space Administration Ocean Vector S.T., *www.remss.com*, 2004.

Annexe A : tableau des fonctions et besoins des acteurs du projet

Acteurs du projet	Etapas du cycle de vie						Fonction	Besoins et souhaits
	Conception	Acquisition	Construction	Mise en service	Plaine capacité	Déchargement		
Investisseur							<ul style="list-style-type: none"> - Fournit des fonds au développeur et à l'opérateur du système Farwind - Possède des parts du développeur et/ou de l'opérateur du système Farwind - Définit un retour sur investissement et une rentabilité - Génère du profit 	<ul style="list-style-type: none"> - Rentabilité du marché et retour sur investissement du projet avec un risque minimum - Risques sur les revenus et la durée de vie bien compris et maîtrisables (incluant les risques sur les actions) - Réputation maintenue pour assurer la valeur des actions (le projet doit avoir une bonne presse)
Financier							<ul style="list-style-type: none"> - Fournit des fonds au développeur et à l'opérateur du système Farwind - Définit un taux de prêt et encaisse les profits du prêt - Génère du profit durant l'étape de production - Achète l'hydrogène produit - Utilise ou vend l'hydrogène au consommateur final (par exemple par le biais de stations pour véhicules à hydrogène) 	<ul style="list-style-type: none"> - Taux d'intérêts compétitifs pour la durée du prêt et valeur nette actuelle positive - Risques pour les revenus et la durée de vie bien compris et maîtrisables - Hydrogène à prix compétitif - Apports fiables du point de vue de l'utilisation ou du consommateur final (par exemple apports régulier pour une raffinerie, capacité de fournir régulièrement les stations service)
Utilisateur d'hydrogène							<ul style="list-style-type: none"> - Définit la spécification pour la distribution d'hydrogène (par exemple la pression, la température, la durée, le débit maximum) - Transporte l'hydrogène aux utilisateurs 	<ul style="list-style-type: none"> - Caractéristiques de l'hydrogène fournies fiables (propriétés physiques contrôlées) - Apport régulier
Réseau de distribution de l'hydrogène et/ou Propriétaire du réseau							<ul style="list-style-type: none"> - Effectue les études d'impact environnementaux - Donne les autorisations et accords d'exploitation de la zone de production, des chenaux de transit, du terminal et des infrastructures de maintenance afin de limiter les impacts environnementaux - Coordonne et effectue les opérations de sauvetage autour et dans la zone d'exploitation ou sur les chenaux de transit (cela peut inclure les opérateurs du système Farwind) - Contrôle le trafic des chenaux de transit et de la zone d'exploitation 	<ul style="list-style-type: none"> - Exigences réglementaires atteintes vis-à-vis des impacts environnementaux - Opérations de recherche et sauvetage sûres - Être assisté par les navires de surveillance et de transport Farwind - Zones d'exploitation et de transit identifiées - Suivi du trafic en temps réel sur les zones d'exploitation et de transit
Organisme de contrôle environnemental							<ul style="list-style-type: none"> - Vérifie le projet et sa conformité au regard des autres réglementations (par exemple la santé et sécurité, les conditions de travail) - Vérifie l'utilisation par le projet de l'espace maritime - Vérifie le bail ou les autorisations pour l'exploitation de l'espace maritime 	<ul style="list-style-type: none"> - Autres exigences réglementaires atteintes (exemple santé et sécurité) - Exigences réglementaires de l'usage de l'espace maritime atteintes - Apport socio-économique de l'utilisation de l'espace maritime
Société de sécurité et de sauvetage en mer							<ul style="list-style-type: none"> - Utilise les zones de transit et/ou d'exploitation - Se positionne pour ou contre le projet Farwind selon comment il impacte son activité 	
Agence de contrôle du trafic maritime							<ul style="list-style-type: none"> - Fournit le bail ou les autorisations pour l'utilisation de l'espace et des équipements portuaires (incluant l'installation de nouveaux équipements) 	<ul style="list-style-type: none"> - Impact des activités acceptable
Autres services de régulation (exemple agence de contrôle santé et sécurité)							<ul style="list-style-type: none"> - Fournit le permis de construire des installations sur la zone portuaire 	<ul style="list-style-type: none"> - Impact de l'utilisation du port par le projet Farwind acceptable pour les autres activités du port
Agence de gestion du site de production et des zones de transit (si applicable)							<ul style="list-style-type: none"> - Facilite le développement et l'exploitation du projet Farwind (avantages fiscaux, subventions, obligations, prêts à taux garantis, tarifs de subventionnement) - Se positionne pour ou contre le projet Farwind selon comment il impacte son mode de vie et/ou ses moyens de subsistance 	<ul style="list-style-type: none"> - Prérequis du permis de construire des installations atteints - Impact de l'utilisation du port par le projet Farwind acceptable pour les autres usages du port - Retombées sociales positives dans la région, comme des recettes de taxe, des créations d'emplois, la réduction des émissions GES
Autres utilisateurs de la zone de production et des zones de transit (pêche, commerce, activités militaires, extraction)							<ul style="list-style-type: none"> - Se positionne pour ou contre le projet Farwind selon comment il impacte son mode de vie et/ou ses moyens de subsistance 	<ul style="list-style-type: none"> - Retombées positives pour la société (création d'emploi, source d'énergie sécurisée) - Hydrogène de source renouvelable à faible émission GES et à prix compétitif
Agence de gestion de la zone portuaire							<ul style="list-style-type: none"> - Fournit le permis de construire des installations sur la zone portuaire 	
Service de régulation de la construction portuaire							<ul style="list-style-type: none"> - Utilise le port 	
Autres utilisateurs de la zone portuaire							<ul style="list-style-type: none"> - Facilite le développement et l'exploitation du projet Farwind (avantages fiscaux, subventions, obligations, prêts à taux garantis, tarifs de subventionnement) - Se positionne pour ou contre le projet Farwind selon comment il impacte son mode de vie et/ou ses moyens de subsistance 	
Service de développement local, régional et national et décideur politique							<ul style="list-style-type: none"> - Se positionne pour ou contre le projet Farwind selon son impact sur la société 	
Communauté locale							<ul style="list-style-type: none"> - Achète l'hydrogène produit par le système Farwind aux fournisseurs d'hydrogène 	
Grand public								

FIGURE III.36 – Pré-requis demandés par les acteurs du système Farwind (partie 1/3).

Acteurs du projet	Etapes du cycle de vie							Fonction	Besoins et souhaits
	Conception	Acquisition	Construction	Mise en service	Plleine capacité	Déchargement	Arrêt		
	Démantèlement								
Développeur du projet Farwind								<ul style="list-style-type: none"> - Développe le projet Farwind et son plan de développement commercial - Obtient des financements des investisseurs et financeurs - Obtenir les permis nécessaires pour construire, installer et exploiter le système - S'assure que le projet Farwind est qualifié pour être assuré - Réalise les contrats avec les sous-traitants, dirige la construction des installations et coordonne l'étape de mise en service - Vend le projet Farwind à l'opérateur 	<ul style="list-style-type: none"> - Développement du système Farwind moins coûteux que sa vente - Maintient de la bonne réputation du projet pour assurer les actions futures - Ventes stables pour maintenir l'activité - Temps de développement court et prévisible - Autorisations accessibles et sans restrictions opérationnelles - Risques compris et qui peuvent être réduits durant la construction (incluant la sécurité)
Opérateur du système Farwind								<ul style="list-style-type: none"> - Achète le projet Farwind au développeur - Exploite le système Farwind (incluant le routage des flottes) - Vend l'hydrogène aux utilisateurs ou fournisseurs - Maintient le système en conditions opérationnelles - Réalise le démantèlement 	<ul style="list-style-type: none"> - Exploitation du système Farwind moins coûteuse que la vente de sa production - Risques sur les revenus bien compris et maîtrisables - Drones performants et manoeuvrables pour un routage facile des flottes - Système Farwind sûr à exploiter et maintenir - Pas de restrictions d'exploitation ni de besoin de surveillance
Fournisseur des flottes Farwind (incluant les drones, les sous-systèmes de surveillance et les navires de transport)								<ul style="list-style-type: none"> - Fournit un cahier des charges certifié pour les drones, systèmes de surveillance et/ou navires de transport ainsi que pour leur exploitation, maintenance et démantèlement - Fournit les pièces détachées - Fournit une garantie des sous-systèmes et de la production énergétique dans des conditions de vent spécifiées 	<ul style="list-style-type: none"> - Sous-systèmes moins coûteux que le prix de vente disponible des systèmes - Ventes stables pour maintenir l'activité - Pas de clause de garantie (performance du système ne dépendant que du vent, et pas d'autres conditions telle que l'état de mer)
Prestataire de maintenances des flottes Farwind								<ul style="list-style-type: none"> - Réalise les opérations de maintenance des flottes - Gère le stock de pièces détachées - Peut retourner certains éléments au fournisseur pour la maintenance - Granti la disponibilité minimum des flottes 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût de maintenance plus faible que son prix de vente - Opérations de maintenance sûres - Ventes stables pour maintenir l'activité
fournisseur du terminal d'hydrogène (incluant le stockage)								<ul style="list-style-type: none"> - Fournit un cahier des charges certifié du terminal et pour son exploitation, sa maintenance et son démantèlement - Fournit les pièces détachées - Fournit une garantie pour le terminal et ses capacités de déchargement et de stockage 	<ul style="list-style-type: none"> - Terminal moins coûteux que son prix de vente - Ventes stables pour maintenir l'activité - Pas de clause de garantie
Prestataire de maintenance du terminal d'hydrogène								<ul style="list-style-type: none"> - Réalise les opérations de maintenance sur le terminal - Gère le stock de pièces détachées - Peut retourner certains éléments au fournisseur pour la maintenance - Garantie la disponibilité minimale du terminal 	<ul style="list-style-type: none"> - Maintenance moins coûteuse que son prix de vente - Opérations de maintenance sûres - Ventes stables pour maintenir l'activité
Fournisseur du centre de communication et de contrôle								<ul style="list-style-type: none"> - Fournit un cahier des charges certifié pour le centre de communication et de contrôle ainsi que pour son exploitation, sa maintenance et son démantèlement - Fournit les pièces détachées - Fournit une garantie des capacités du centre de communication et de contrôle 	<ul style="list-style-type: none"> - Centre de contrôle et de communication moins coûteux que son prix de vente - Ventes stables pour maintenir l'activité - Pas de clause de garantie
Société de génie océanique								<ul style="list-style-type: none"> - Informe des conditions météorologiques marines pour l'exploitation et la maintenance 	<ul style="list-style-type: none"> - Données et modèles météorologiques disponibles pour réaliser une prévision
Organisme de certification								<ul style="list-style-type: none"> - Révise et certifie le design et procédures selon les standards et recommandations existants 	<ul style="list-style-type: none"> - Standards et recommandations applicables à la conception et à l'exploitation de systèmes Farwind
Société de recyclage et de traitement des déchets								<ul style="list-style-type: none"> - Détruit, recycle et élimine les restes du système Farwind (terminal et flottes) 	<ul style="list-style-type: none"> - Démantèlement du système Farwind moins coûteux que son prix de vente - Récupération facile des matériaux pour le recyclage
Assureur								<ul style="list-style-type: none"> - Fournit une assurance, incluant les dommages de tiers sur les drones, systèmes de surveillance ou navires, assurance contre les risques climatiques et "assurances tout risque chantier" - Fournit une assurance sur la production et les revenus 	<ul style="list-style-type: none"> - Risques des biens du projet et des impacts sur les tiers bien compris et maîtrisables - Risques sur la production bien compris et maîtrisables

FIGURE III.37 – Pré-requis demandés par les acteurs du système Farwind (partie 2/3).

Acteurs du projet	Etapas du cycle de vie							Fonction	Besoins et souhaits
	Conception	Acquisition	Construction	Mise en service	Pléine capacité	Déchargement	Déplacement		
	Arrêt	Démantèlement							
Société de distribution d'hydrogène et/ou de construction du réseau de distribution								- Réalise les révisions nécessaires pour le renforcement ou la création du réseau de distribution d'hydrogène ou la grille d'approvisionnement (par exemple les travaux de génie civil comme la dépose de conduites d'hydrogène, la construction de station service, etc.)	- Services fournis moins coûteux que leur prix de vente - Ventes stables pour maintenir l'activité
Société de construction et de génie civil								- Réalise les études et travaux de génie civil pour le fournisseur du terminal d'hydrogène (par exemple la construction d'un nouveau quai) - Propose des services de démolition des infrastructures pour les sociétés de démantèlement - Fournit un service de transport terrestre	- Services fournis moins coûteux que leur prix de vente - Ventes stables pour maintenir l'activité
Société de transport terrestre								- Fournit un service de stockage terrestre	- Services fournis moins coûteux que leur prix de vente - Ventes stables pour maintenir l'activité
Société de stockage terrestre								- Fournit un service de stockage terrestre	- Services fournis moins coûteux que leur prix de vente - Ventes stables pour maintenir l'activité
Société de transport maritime								- Fournit un service de transport maritime	- Services fournis moins coûteux que leur prix de vente - Ventes stables pour maintenir l'activité
Société de stockage maritime								- Fournit un service de stockage maritime	- Services fournis moins coûteux que leur prix de vente - Ventes stables pour maintenir l'activité

FIGURE III.38 – Pré-requis demandés par les acteurs du système Farwind (partie 3/3).

Titre : Analyse, modélisation et optimisation d'un voilier hydro-éolien de production d'hydrogène

Mots clés : Voilier hydro-éolien, hydrogène, énergie éolienne, énergies marines renouvelables, rotors Flettner, modélisation, optimisation

Résumé : Cette thèse porte sur un concept innovant pour la récupération de l'énergie du vent en mer : le voilier hydro-éolien. Dans ce concept, un navire avance grâce à une propulsion éolienne. Des hydrogénérateurs sont fixées sous la coque et produisent de l'électricité. L'électricité est convertie en hydrogène par électrolyse puis stockée à bord. Le voilier hydro-éolien est constitué de nombreux sous-systèmes. Par une méthode d'ingénierie système, la première partie de la thèse propose un outil d'aide à la décision pour le choix des composants technologiques. Une étude de cas sur le choix du système de propulsion éolien du voilier-hydrolienne est réalisée. Parmi cinq technologies de propulsion éolienne (voiles souples et rigides, rotors Flettner, turbo-voiles, ailes de kite), les rotors Flettner sont sélectionnés. Dans la seconde partie une modélisation numérique du navire en conditions quasi-statiques est réalisée. La modélisation s'appuie

sur la résolution de l'équation du mouvement du navire et par la méthode des écoulements potentiels pour la partie hydrodynamique. L'étude montre qu'un navire de type catamaran de longueur 80 m produit 1 MW électrique dans un vent de travers de 10 m/s. Cela correspond à 2,9 tonnes d'hydrogène par semaine. La puissance nominale (1,73 MW) est atteinte pour une vitesse de vent de 12 m/s.

Dans la dernière partie, une optimisation de la forme de coque est réalisée avec un algorithme génétique NSGA II afin d'augmenter la puissance produite. Elle porte sur des carènes de catamarans symétriques ou non (navires de type prao). Cette étude montre que les formes non-symétriques sont plus performantes. Il est obtenu une puissance produite jusqu'à 12% supérieure à celles obtenues précédemment (soit 3,3 tonnes d'hydrogène par semaine).

Title : Analysis, modelling and optimization of an energy ship for hydrogen production

Keywords : : energy ship, hydrogen, wind energy, marine renewable energy, Flettner rotors, modelling, optimization

Abstract : The present thesis investigates the innovative energy ship concept for offshore wind energy conversion. In this concept, wind is used to propel a ship. Electricity is generated using water turbines attached underneath the hull. The electricity is converted through electrolysis into hydrogen which is then stored aboard. An energy ship is a complex system composed of many sub-systems. In the first part of the thesis, a system engineering approach is used in order to develop a analysis framework for the comparison of solutions for the subsystems. A case study is conducted for the wind propulsion subsystem of an energy ship. Among the five technologies studied (soft and rigid sails, Flettner rotors, turbo-sails and kite wings), Flettner rotors are selected for an application on the energy ship. In the second part a numerical model of the ship is developed in quasi-static conditions. It is based on the resolution of the equation of

motion of the ship and on a potential flow method for the hydrodynamic part of the model. It shows that an energy ship with a catamaran hull of 80 m long is able to produce an electrical power of 1 MW in a 10m/s beam wind. This electrical power is equivalent to a weekly production of 2.9 tons of hydrogen. The nominal power of the ship (1.73 MW) is achieved at a wind speed of 12 m/s.

In the last part, hull optimization is performed using a genetic algorithm (NSGA II). The purpose is to maximize the energy production. Both symmetrical and non-symmetrical catamaran shapes are generated. Results show that non-symmetrical shapes, similar to "proa" ships, achieve the best efficiency. A gain of 15% of power production is obtained compared to the previous results (equivalent to a weekly production of 3.3 tons of hydrogen).