



HAL
open science

De la mesure du vent au pilotage automatique d'un voilier : modélisation, optimisation & application du traitement du signal prédictif

Hugo Kerhascoët

► **To cite this version:**

Hugo Kerhascoët. De la mesure du vent au pilotage automatique d'un voilier : modélisation, optimisation & application du traitement du signal prédictif. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université de Bretagne Sud, 2017. Français. NNT : 2017LORIS433 . tel-03560699

HAL Id: tel-03560699

<https://theses.hal.science/tel-03560699v1>

Submitted on 7 Feb 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.

UNIVERSITE
BRETAGNE
LOIRE

THÈSE / UNIVERSITÉ DE BRETAGNE SUD
UFR Sciences et Sciences de l'Ingénieur
sous le sceau de l'Université Bretagne Loire

pour obtenir le titre de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE BRETAGNE SUD
Mention : Maths-STIC
Ecole doctorale SICMA

présentée par

Hugo Kerhascoët

Préparée au Lab-STICC
et à l'IRENav

Thèse soutenue le 27 janvier 2017

devant le jury composé de :

Alain Loussert

Professeur, ISEN Brest / *Président*

Yannick Le Moulec

Professeur, Tallinn University of Technology / *Rapporteur*

Daniel Ménard

Professeur, INSA Rennes / *Rapporteur*

Christine Chevallereau

Directeur de Recherche CNRS / *Examinatrice*

Bernard Simon

Professeur, Université de Bretagne Occidentale / *Examineur*

Johann Laurent

MCF HDR, Université de Bretagne Sud – Lab-STICC / *Co-directeur de thèse*

Frédéric Hauville

MCF, Ecole Navale – IRENav / *Co-encadrant de thèse*

Éric Senn

MCF HDR, Université de Bretagne Sud – Lab-STICC / *Co-directeur de thèse*

Paul Fraisse

Directeur délégué, nke Marine Electronics / *Membre invité*

Michel Desjoyeaux

Navigateur / *Membre invité*

Thomas Coville

Navigateur / *Membre invité*

**De la mesure du vent au
pilotage automatique
d'un voilier :
modélisation,
optimisation &
application du
traitement du signal
prédictif**

Remerciements

15 jours se sont écoulés depuis ma soutenance. Les dernières corrections effectuées, il est maintenant temps de conclure ce manuscrit par les remerciements. J'aimerais commencer par remercier Fred et Patrick de m'avoir fait découvrir le monde de la recherche. Car il y a encore 4 ans, vers la fin de mon cursus d'ingénieur, la recherche académique était pour moi un monde obscur, et les thésards assimilés au personnage du film "Tanguy". Donc merci Fred et merci Patrick de m'avoir éclairé et aidé à monter le dossier de financement CIFRE/ANRT. Merci aussi pour ces sympathiques moments partagés sur le J80 pour expérimenter/valider toutes ces belles théories en courses suivis des débriefing au bar.

Merci également à l'entreprise nke de m'avoir fait confiance lors de ces 5 années de collaboration. Je pense que tout le monde est unanime pour dire que l'on a su construire ensemble de beaux produits et conserver le leadership sur le pilote automatique. Je souhaite également dire que j'ai apprécié travailler, partager, avec chacun des acteurs de la filiale et du groupe. Et je suis certain que l'on continuera, d'une façon plus ou moins étroite, à travailler ensemble dans l'avenir et que le plaisir sera toujours présent car nous partageons des objectifs communs.

Je souhaite également remercier tout particulièrement mon directeur de thèse Johann, qui a vu ma présence au labo passer du quasi néant les 2 premières années, à presque 24/24H les derniers 6 mois. Merci de m'avoir expliqué les subtilités du monde universitaire et fait comprendre qu'une bonne thèse c'est du bonus. Le revers aura été pour toi d'avoir le "privège" de subir la première relecture de ce "gros" manuscrit. Heureusement que le temps commençait à se faire court sur la fin (et que la fatigue se faisait sentir) car à ma grande surprise, je me suis pris au jeu de la rédaction et j'avais encore plein de choses à raconter. Donc encore merci pour ces moments partagés. Je pense que l'on s'est bien trouvé, et comme tu m'as donné envie de garder un pied dans la recherche académique, on sera sûrement amené à se recroiser. Si ces travaux ont pu rentrer dans 3 années, et comme je le disais avec humour, la répartition 3/4 temps sur les sujets de l'entreprise et 3/4 temps sur ma thèse ont pu être terminés en temps et en heure, c'est grâce à Léa, qui est devenue ma femme durant cette dernière année. Merci Léa de m'avoir soutenu et permis de me consacrer à 100% sur mes travaux. Merci également de m'avoir littéralement remis sur pied l'année passée à reconstruire ce genou cassé.

Je souhaite également remercier mes parents pour m'avoir mis à la voile très jeune et permis d'acquérir une autonomie. Si je pense avoir jusqu'à présent pris les bonnes décisions et

continue aujourd'hui de faire des choix engagés, c'est parce que vous avez su me guider de loin et m'apporter l'assurance qu'en cas d'échec, le socle familial serait toujours là. Merci aussi d'avoir montré l'exemple lors de ses dernières années. À défaut d'être très bavard sur mes travaux et mes projets en général, Maman, je te dédie ce manuscrit. Comme ça, si tu as des questions sur le résidu du filtre de Kalman, je n'aurais pas d'excuses pour me défilier, et je te l'expliquerai avec plaisir.

J'en profite également pour dire à mon frère Pierre que je suis fier de lui. Comme tu vas avoir ton diplôme d'ingénieur et vu que tu t'orientes également vers une thèse, il va falloir que je me trouve un autre diplôme pour garder le lead...

Je souhaite également remercier mes amis qui baignent quasiment tous dans le milieu de la voile et avec qui on parle bien trop souvent de voile et donc de boulot. Vous avez quelque part contribué aux réflexions qui ont mené à ces travaux. Que ce soit lors d'un coup de fil à la pause café pour parler de structure, ou bien à une heure plus avancée pour débattre du tip et du shaft...

Une dédicace particulière aux permanents et doctorants du LAB-STICC. Merci pour ces agréables moments partagés sur la fin de mon contrat. Et une mention spéciale pour mon co-locataire de bureau Maxime et Yohann pour leur engagement corporel lors de mon pot de thèse.

Avec la fin de l'écriture de ces remerciements, se referme pour moi cette thèse mais pas ces travaux, que j'aurai j'en suis sûr, l'occasion de repartager avec vous.

Table des matières

Table des matières	vi
Table des figures	vii
Liste des tableaux	xi
Nomenclature	xiii
Glossaire	xxi
1 Introduction	1
1.1 Contexte & Motivations	3
1.2 Le vent sur un bateau	5
1.2.1 La mécanique du voilier	5
1.2.2 Le triangle de vent	10
1.2.3 Formules de construction du triangle de vent	16
1.2.4 Dérivées partielles	17
1.3 La perturbation de la mesure	21
1.3.1 Les mouvements du bateau	21
1.3.2 Emplacement de l'aérien	24
1.3.3 La couche basse de l'atmosphère	26
1.3.4 La mesure depuis l'extérieur	30
1.4 Performance et outils au service de la performance	33
1.4.1 Polaire de vitesse & <i>VMG</i>	34
1.4.2 Centrales de navigation	38

1.5	Conclusion	47
2	Le Vent Apparent	49
2.1	Introduction	52
2.2	Les capteurs	52
2.2.1	Moyens de mesure de la vitesse	52
2.2.2	Moyens de mesure de la direction	61
2.2.3	Technologie sélectionnée	63
2.3	L'anémomètre à coupelle	65
2.3.1	Caractéristiques de l'écoulement de l'air sur une coupelle	65
2.3.2	Coefficient de portance et de traînée	66
2.3.3	Rotor symétrique	68
2.3.4	Rotor asymétrique	72
2.3.5	Réponse à la gîte	75
2.3.6	Constante de temps et de distance	75
2.3.7	Précision de la mesure	77
2.3.8	Overspeed	80
2.3.9	Masquage de la perche	81
2.3.10	Comportement en régime établi / Calibration	82
2.4	Modélisation de la girouette	84
2.4.1	Équations	85
2.4.2	Validation Expérimentale	91
2.5	Optimisation de la forme de pale	97
2.5.1	Introduction	97
2.5.2	Données d'entrée	97
2.5.3	Résultats	104
2.5.4	Optimisation du contrepoids	107
2.5.5	Conclusion	111
2.6	Traitement du signal prédictif	113
2.6.1	Introduction & théorie	113
2.6.2	Application à la girouette	116

2.6.3	Application à l'anémomètre	122
2.7	Conclusion	130
3	La reconstruction du vent réel	133
3.1	Introduction	135
3.2	Définitions et Normes	135
3.2.1	Moyenne de la vitesse et de la direction du vent	135
3.2.2	Autres métriques caractérisant le vent	139
3.3	Phénomènes perturbateurs	147
3.3.1	Wind Shear	147
3.3.2	"Poids de l'air"	153
3.3.3	Estimation de l'upwash	159
3.3.4	État de la mer	160
3.4	Chaîne de reconstruction du vent réel	163
3.4.1	Méthodologie usuelle	164
3.4.2	Chronologie du passage du vent météo au signal fourni par l'aérien	167
3.4.3	Détail de la chaîne de reconstruction	169
3.4.4	Conclusion	171
3.5	Conclusion	172
4	Application au pilotage automatique	173
4.1	Introduction	174
4.2	Mode Rafale	176
4.2.1	Contexte	176
4.2.2	Fonctionnement	176
4.2.3	Évolutions	178
4.3	Mode surf	179
4.3.1	Contexte	179
4.3.2	Objectif	179
4.3.3	Fonctionnement	181
4.3.4	Résultats	182
4.4	ePenons	183

4.4.1	Introduction	183
4.4.2	Intégration au pilotage automatique	184
4.4.3	Conclusion	186
4.5	Conclusion	188
5	Conclusion	189
A	Angle Effectif	193
A.0.1	Matrices de rotation	193
A.0.2	Recherche de l'angle effectif β_{eff}	193
A.0.3	Recherche de l'angle d'attaque vertical ψ	195
B	Moulinets	197
C	Modélisation de la mer et de la réponse en tangage	199
C.1	Introduction	199
C.2	Modèle de mer	199
C.3	Modèle de RAO	200
C.3.1	Fréquence réduite	200
C.4	Simulation	201
D	Interface Pied de Mât	203
	Bibliographie	205
	Résumé	215

Table des figures

1.1	Comparaison des forces produites par un profil utilisé uniquement en écoulement décollé et un autre en régime d'écoulement attaché.	6
1.2	Évolution des coefficients de portance et de traînée d'une voile en fonction de l'angle d'incidence.	7
1.3	Coefficients $C_p C_t$ représentés sous forme de polaire.	8
1.4	Schéma à l'équilibre des résultantes des forces aérodynamiques et hydrodynamiques en présence sur un voilier.	9
1.5	Triangle de vent au près & au portant.	10
1.6	Comparaison du vent réel surface et vent réel fond en fonction du courant.	13
1.7	Schéma de l'effet de la dérive sur la route surface.	14
1.8	Comparaison des méthodes d'estimation de la dérive par la formule de Pedrick et de Garrett.	15
1.9	Écart ε entre β_{app} et β_{eff} en fonction d'une gîte seule.	22
1.10	Évolution des mesures faites par l'aérien en fonction de l'assiette du bateau.	23
1.11	Corrélation dans le domaine fréquentiel entre β_{mess} et ϕ	24
1.12	Emplacements d'aériens sur un AC50.	25
1.13	Illustration de la turbulence en tête de mât	26
1.14	Formation de la couche limite au contact d'une paroi.	27
1.15	Évolution de V_T en fonction de l'altitude z	28
1.16	Vrillage du vent apparent causé par le gradient vertical de V_T	29
1.17	Exemple de gradient et shear très prononcés.	30
1.18	Reconstitution virtuelle des AC World Series.	31
1.19	Cartographie du champ de vent reconstitué.	32
1.20	Polaire de vitesse d'un 60" Imoca.	33

1.21	Exemples de calcul du VMG en fonction de l'allure.	36
1.22	Exemple de l'effet de la dérive sur le calcul du VMG	37
1.23	Exemple de l'effet du courant sur le calcul du VMG	38
1.24	Schéma électrique de la centrale analogique développée par McCurdy [McCurdy, 1970] en 1970.	39
1.25	Différentes technologies de capteurs speedomètre	40
1.26	Désaxement de la carène/surface mouillée, par rapport à la ligne de foi lorsque le bateau gîte.	42
1.27	Zone de couverture des systèmes SBAS. <i>Crédit : SXBluegps</i>	43
2.1	Différents anémomètres.	53
2.2	Anémomètre de Romney & Anémo-girouette à hélices.	55
2.3	Anémomètres ultrasoniques	57
2.4	Performances de l'anémomètre CV7.	58
2.5	Sodars	59
2.6	Lidars	60
2.7	Évolution des pales nke suite à des réflexions empiriques.	62
2.8	Anémomètres asymétriques permettant de déterminer la direction du vent.	63
2.9	Diagramme présentant le processus d'optimisation de la girouette.	64
2.10	Graph de $C_N(\alpha_i)$	67
2.11	Schéma des forces exercées sur l'anémomètre	70
2.12	Forces sur le moulinet	71
2.13	Comparaison des évolutions du facteur anémométrique K	75
2.14	Réponse à la gîte de l'anémomètre	76
2.15	Résolution temporelle de l'anémomètre nke en fonction de la vitesse du vent.	77
2.16	Erreur en pourcentage et de quantification sur l'estimation de la vitesse moyenne sur une révolution du rotor.	79
2.17	Overspeed de l'anémomètre.	81
2.18	Influence du support sur V_{mes}	82
2.19	Aérien de la marque $Omega^{MD}$ n'étant pas soumis au phénomène de masquage du support.	82
2.20	Linéarité testée en soufflerie des anémomètres	83

2.21	Repère Pale.	84
2.22	Exemple de 3 réactions à un échelon pour un système du 2 nd ordre.	85
2.23	Dimensions caractérisant la forme de la pale.	88
2.24	Designs des pales découpées pour la validation du modèle.	93
2.25	Comparaison de la réponse à un échelon avec sa prédiction par le modèle. . .	94
2.26	Précision sur ζ & ω du modèle.	95
2.27	Diagramme de Bode des girouettes nke et B&G.	99
2.28	Exemple de 150 routages statistiques pour le parcours de la transat Jacques Vabre 2015.	103
2.29	Exemple de distributions de vent apparent.	104
2.30	Comparaison des performances entre les anciennes pales et la nouvelle pale issue du processus d'optimisation.	105
2.31	Superposition des dessins de l'ancienne pale non optimisée (nke-V2) et de la nouvelle.	106
2.32	IHM logiciel d'aide à l'optimisation.	107
2.33	Gains de performance obtenus par le déséquilibre du contrepoids.	110
2.34	Gains sur le temps de réponse obtenu par le déséquilibre du contrepoids en fonction de la gîte du bateau.	111
2.35	Diagramme résumant le processus d'optimisation de la girouette.	116
2.36	Performance du filtrage prédictif sur la réponse de la girouette.	121
2.37	Filtre de Kalman appliqué à l'anémomètre via l'équivalent d'un 1 ^{er} ordre. . .	123
2.38	Détermination de C_A	126
2.39	Détermination de C_D	127
2.40	Résultat du traitement du signal sur la réponse à un échelon du moulinet. . .	129
2.41	Performance obtenue lorsque le traitement du signal est appliqué à la girouette.	131
2.42	Résumé des gains obtenus.	131
3.1	Comparaison des moyennes par méthode arithmétique et vectorielle.	137
3.2	Distribution de probabilité de la vitesse du vent réel.	143
3.3	Diagramme BET.	145
3.4	Exemples de gradients de vitesse.	149
3.5	Graphique de l'évolution de l'angle d'upwash.	160

3.6	Exemples de mauvaises prises en compte de l'angle de dérive dans le triangle de vent.	163
3.7	Exemple de reconstruction du vent réel.	164
3.8	Diagramme de transformation vent météo → signal de l'aérien.	168
3.9	Proposition d'enchaînement des étapes de reconstruction du vent réel.	169
4.1	Synopsis du fonctionnement et des flux d'informations du pilote automatique nke.	174
4.2	Enregistrement de deux minutes effectué sur le mini N°800 avec le mode surf activé.	182
4.3	État des penons suivant l'angle d'incidence et l'état du flux.	184
4.4	Captures écran de la vidéo d'un test sous pilotage automatique.	187
B.1	Modèles 3D des moulinets imprimés pour les tests en soufflerie.	197
C.1	Spectre de Pierson-Moskowitz	200
C.2	Comparaison de différents RAO	201
C.3	Construction du spectre de puissance de tangage $S_t(\omega)$	202
C.4	Exemple de simulation de tangage pour un J80 au près dans 15nds de vent réel.202	
D.1	Photo de l'interface pied de mât.	203

Liste des tableaux

1.1	Dérivées partielles d'un 60" Imoca	19
1.2	Masse volumique de l'air sec en fonction de la température pour $P_s = 1013,25hPa$	30
1.3	Table de vitesses cibles $V_{BsTarget}$ correspondant à la Figure (1.20).	35
1.4	Table de VMG correspondant à la Figure (1.20).	35
1.5	Table d'interactions entre les données mesurées et les données calculées.	45
2.1	Coefficients caractéristiques des godets des principaux anémomètres du nautisme.	67
2.2	Contraintes que le solveur doit respecter.	100
2.3	Objectifs que le solveur doit chercher à atteindre.	101
3.1	Exemples de longueurs de rugosité en fonction du type de terrains.	150
3.2	Polaire d'angle de vent apparent d'un 60" Imoca	152
3.3	Cisaillement du vent apparent sur un 60".	152
3.4	Variations de la densité de l'air en fonction des paramètres atmosphériques.	155
3.5	Exemples de vents équivalents en fonction du VMG	158
3.6	Matrices du filtre d'estimation de $H_{1/3}$	161
3.7	Échelle de Beaufort et état de mer correspondant.	162
4.1	Exemple de table rafale.	177

Nomenclature

Symbole	Unité	Description
Vecteurs		
\vec{V}_{app}		Vecteur vent apparent dans le repère R_{BFlat}
\vec{V}_{eff}		Vecteur vent apparent dans le repère R_{BDyn}
$MC\vec{V}_{app}$		Vecteur vent apparent dans le repère R_{BFlat} corrigé de $\vec{V}_{MastBFlat}$
$MC\vec{V}_{eff}$		Vecteur vent apparent dans le repère R_{BDyn} corrigé de $\vec{V}_{MastBDyn}$
$\vec{V}_{T_{Surf}}$		Vecteur vent réel dans le repère surface
$\vec{V}_{T_{Ground}}$		Vecteur vent réel dans le repère fond
$\vec{V}_{MastBDyn}$		Vecteur de déplacement de la tête de mât créé par les mouvements du bateau dans le repère R_{BDyn}
$\vec{V}_{MastBFlat}$		Vecteur de déplacement de la tête de mât créé par les mouvements du bateau dans le repère R_{BFlat}
\vec{V}_{Surf}		Vecteur de déplacement du bateau dans le repère surface
\vec{V}_{Ground}		Vecteur de déplacement du bateau dans le repère fond
\vec{V}_{Curr}		Vecteur courant
Vitesses		
V_{mes}	<i>nds</i>	Vitesse du vent apparent mesurée par l'anémomètre
V_{app}	<i>nds</i>	Vitesse du vent apparent dans le repère R_{BFlat}
MCV_{app}	<i>nds</i>	Vitesse du vent apparent corrigée des mouvements du mât
$V_{T_{Surf}}$	<i>nds</i>	Vitesse du vent réel surface
$V_{T_{Ground}}$	<i>nds</i>	Vitesse du vent réel fond
V_S	<i>nds</i>	Vitesse du bateau mesurée par le speedomètre
V_{Bs}	<i>nds</i>	Vitesse du bateau dans le référentiel surface
V_{Curr}	<i>nds</i>	Vitesse du courant
$V_{BsTarget}$	<i>nds</i>	Vitesse cible
$^N V_{T_{Surf}}$	<i>nds</i>	Vitesse du vent réel surface normalisée par la densité de l'air
V_λ	<i>nds</i>	Vitesse de dérive
V_t	<i>nds</i>	Vitesse terminale

Angles

β_{mes}	°	Angle mesuré par la girouette
β_{eff}	°	Angle de vent effectif
β_{app}	°	Angle de vent apparent dans le plan horizontal
$MC\beta_{eff}$	°	Angle de vent effectif corrigé des mouvements du mât
$MC\beta_{app}$	°	Angle de vent apparent corrigé des mouvements du mât
ψ	°	Angle d'attaque vertical du vent effectif
$\beta_{T_{Surf}}$	°	Angle de vent réel surface
$\beta_{T_{Ground}}$	°	Angle de vent réel fond
λ	°	Angle de dérive
α_i	°	Angle d'incidence entre la corde de la voile et β_{eff}
$\beta_{T_{Target}}$	°	Angle de vent réel cible
γ	°	Angle d'upwash
$O_{\beta_{mes}}$	°	Offset d'alignement additionné à β_{mes}
β_{sea}	°	Angle entre le cap du bateau et la direction des vagues
β_{mat}	°	Angle de mât
θ_{mat}	°	Angle de quête du mât
ϕ_{mat}	°	Angle de bascule latérale du mât
$O_{\beta_{mat}}$	°	Offset de vrillage du mât
α_r	°	Angle de barre
$\alpha_{r_{Target}}$	°	Consigne d'angle de barre
$C_{M_{V_{mes}}}$		Coefficient de correction du masquage de la perche à appliquer sur V_{mes}
$C_{\psi_{V_{mes}}}$		Coefficient de correction de la "gîte" à appliquer sur V_{mes}
C_{γ_x}		Coefficient de l'estimation de l'angle d'upwash

Directions

$\Theta_{T_{Surf}}$	°	Direction du vent réel surface
$\Theta_{T_{Ground}}$	°	Direction du vent réel fond
Θ_{Curr}	°	Direction vers laquelle porte le courant

Attitude

α	°	Yaw
θ	°	Pitch
ϕ	°	Roll

Référentiels

R_{BDyn}	Référentiel Bateau
R_{BFlat}	Origine identique à R_{BDyn} , les deux axes x sont dans le même plan vertical mais le plan (xOy) de R_{BFlat} est horizontal

R_{Benu}		Origine confondue avec R_{BDyn} et R_{BFlat} mais vecteurs orientés vers l'Est, le Nord et le haut
R_{Surf}		Repère ENU avec origine à la surface et axe z passant par le CIR .
R_{Ground}		Repère ENU avec origine au fond et axe z passant par le CIR .

Hauteurs

$z_{capteur_D}$	m	Hauteur du capteur dans le référentiel R_{BDyn}
z_{CV_D}	m	Hauteur du centre vélique dans le référentiel R_{BDyn}
$z_{capteur}$	m	Hauteur du capteur dans le référentiel R_{BFlat}
z_{CV}	m	Hauteur du centre vélique dans le référentiel R_{BFlat}
z_{ref}	m	Hauteur de référence au dessus de la mer dans le référentiel R_{BFlat}
z	m	Hauteur dans le référentiel R_{BFlat}
h_{abl}	m	Limite haute de la couche limite atmosphérique dans le référentiel R_{Surf}

Matrices de passage

P_{BDyn}^{BFlat}		Matrice de passage du repère R_{BDyn} vers R_{BFlat}
P_{BFlat}^{BDyn}		Matrice de passage du repère R_{BFlat} vers R_{BDyn}

Centres, points d'application

CG		Centre de Gravité
CC		Centre de Carène
CD		Centre de Dérive
CV		Centre Vélique
CIR		Centre Instantané de Rotation

Abréviations

VMG	nds	Velocity Made Good
VMC	nds	Velocity Made good on Course
CMG	nds	Course Made Good
GMG	nds	Ground Made Good
COG	nds	Course Over Ground
SOG	nds	Speed Over Ground

Aéro - Hydrodynamique

C_i		Coefficient aérodynamique
$C_N(\alpha_i)$		Coefficient de portance normale du godet
ρ	kg/m^3	Masse volumique
μ	$Pa.s$	Viscosité dynamique
F_{Aero}	N	Résultante des forces aérodynamiques
F_{Hydro}	N	Résultante des forces hydrodynamiques

Fp_{Aero}	N	Force de portance aérodynamique
Ft_{Aero}	N	Force de traînée aérodynamique
Fp_{Hydro}	N	Force de portance hydrodynamique
Ft_{Hydro}	N	Force de traînée hydrodynamique
$F_{propulsive}$	N	Composante de F_{Aero} selon \vec{V}_{Surf}
F_{derive}	N	Composante de F_{Aero} selon l'orthogonale de \vec{V}_{Surf}
z_0	m	Longueur de rugosité
K_λ		Coefficient de dérive
ω	rad/s	Fréquence des vagues
ω_e		Fréquence réduite
T	$^\circ C$	Température
S	m^2	Surface de référence
m	kg	Masse
g	m/s^2	Accélération normale de la pesanteur
q	Pa	Pression dynamique
P_s	Pa	Pression statique
P_t	Pa	Pression totale
v_t	nds	Vitesse terminale
φ	$\%$	Humidité relative
C_s	m/s	Vitesse du son dans l'air
r	m	Rayon du godet
R_r	m	Rayon du rotor
d	m	Diamètre du godet
h	m	Profondeur du godet
P	m	Périmètre
I	$kg.m^2$	Moment d'inertie
I_u	$\%$	Intensité de la turbulence
θ	rad/s	Position angulaire, du rotor, de la pale
C_{tf}		Coefficient de traînée du godet de face, partie concave
C_{td}		Coefficient de traînée du godet de dos, partie convexe
dc_a	m	Constante de distance de l'anémomètre
dc_v	m	Constante de distance de la girouette
τ_a	s	Constante de temps de l'anémomètre
τ_v	s	Constante de temps de la girouette
\mathcal{M}_x	$N.m$	Notation du couple ou d'un moment
fr	Hz	Fréquence de rotation
$\epsilon_{overspeed}$	$\%$	Sur-estimation de V_{eff}
V_m	m/s	Vitesse minimale requise pour un démarrage en position optimale
V_M	m/s	Vitesse minimale requise pour un démarrage en position défavorable
dR_a	m	Résolution spatiale de l'anémomètre

tR_a	s	Résolution temporelle de l'anémomètre
A, B, C		Coefficients de la fonction de transfert de l'anémomètre
Re		Nombre de Reynolds

Modélisation de la pale et du moulinet

ω_0	rad/s	Pulsation naturelle
ω_p	rad/s	Pulsation propre
ω_r	rad/s	Pulsation de résonance
ζ		Coefficient d'amortissement
$Tr_x \%$	s	Temps de réponse à $x\%$ du signal
β	rad	Position absolue de la girouette
β_{eff}	rad	Dans le cadre de la l'équa-diff, direction du vent apparent
x_A	m	Centre d'application aérodynamique
x_G	m	Barycentre
C_p		Coefficient de portance de la pale
λ		Allongement de la pale
K_λ		Coefficient pondérateur de C_p par l'allongement
A, B, C, L, H		Dimensions caractérisant la pale
I_q	m^4	Moment quadratique
I_p	$kg.m^2$	Moment d'inertie de la pale
I_{cp}	$kg.m^2$	Moment d'inertie du contrepoids
I_t	$kg.m^2$	Moment d'inertie de la tête de la girouette
α_f	$^\circ$	Angle de flèche de la pale delta
e	m	Épaisseur de la pale
m_p	kg	Masse de la pale
m_{cp}	kg	Masse du contrepoids
r_{cp}	m	Distance contrepoids-axe de rotation de la girouette
R_{cp}	m	Rayon du contrepoids
L_{cp}	m	Longueur du contrepoids
Ms	kg/m^2	Masse surfacique
\mathcal{M}_p	$N.m$	Moment exercé par la gravité sur la pale
\mathcal{M}_{cp}	$N.m$	Moment exercé par la gravité sur le contrepoids
C_r	$N.m$	Couple de frottement sec des roulements
C_a		Coefficient du couple d'accélération
C_d		Coefficient du couple de décélération
C_A	m^{-1}	Coefficient de l'équation du mouvement de l'anémomètre en accélération
C_D	m^{-1}	Coefficient de l'équation du mouvement de l'anémomètre en décélération

Notations

X	Scalaire
-----	----------

$ X $	Valeur absolue
σ_X	Écart Type
σ_X^2	Variance
\hat{X}	Estimateur
$\langle X \rangle$	Moyenne arithmétique
\bar{X}_i	Moyenne i : q uadratique, h armonique, g éométrique
X'	Partie aléatoire
\widehat{X}	Valeur de pointe
\dot{X}	Dérivée
$\mathbb{E}(X)$	Espérance
\tilde{X}	Erreur sur l'estimation de X

Kalman

X_k	Vecteur d'état
y_k	Vecteur de mesure
F_k	Matrice de transition d'état
H_k	Matrice d'observation
w_k	Bruit de modèle
v_k	Bruit de mesure
Q_k	Matrice de covariance du bruit de modèle
R_k	Matrice de covariance du bruit de mesure
K_k	Matrice du gain de Kalman
P_k	Matrice de covariance de l'erreur
J_k	Jacobienne de $f(X_k)$
S_k	Matrice de covariance de l'innovation
Te	Période d'itération du filtre
ε_x	Bruit de modèle sur x

Météo & Statistique

∇V		Gradient de vitesse du vent réel, en fonction de l'altitude
$\nabla \beta$		Gradient de direction (cisaillement) du vent réel en fonction de l'altitude
V_*	nds	Vitesse de rugosité
k		Constante de Von Karman
$H_{1/3}$	m	Hauteur significative des vagues
S_v	m^2/Hz	Densité de puissance de la hauteur des vagues
S_t	$^\circ^2/Hz$	Densité de puissance du tangage
Δ_T	$^\circ$	Différence de température entre l'air est l'eau
$C_{\Delta T p}$		Coefficient de correction de la rugosité par Δ_T positif
$C_{\Delta T n}$		Coefficient de correction de la rugosité par Δ_T négatif
α_c	$m.s^{-1}$	Constante de Cook

V_c	nds	Vitesse de vent constant
V_e	nds	Vitesse de vent équivalent
R_h	$J.mol^{-1}.K^{-1}$	Constante spécifique de l'air humide
R_s	$J.kg^{-1}.K^{-1}$	Constante spécifique de l'air sec
R_v	$J.kg^{-1}.K^{-1}$	Constante spécifique de la vapeur d'eau
φ	%	Humidité relative
$\gamma\beta_{eff}$	°	Angle de vent effectif incluant l'upwash
γV_{eff}	nds	Vitesse de vent effectif incluant l'upwash
$C_{\gamma i}$		Coefficients d'estimation de l'upwash
$g(\tau)$	s	Facteur de pointe
τ_{ref}	s	Période de référence pour l'équation du facteur de pointe
Θ_{Δ}	°	Direction scindant les gains d'oscillations en deux
Δ_s	°	Amplitude de l'oscillation
$\Delta_{VMG/s}$	%	Gain de VMG entre les 2 amures pour l'oscillation donnée
ϵ_H	m	Erreur de dérive en z de la centrale inertielle
$\beta_{app}LT$	°	Valeur moyennée sur une longue période de l'angle de vent apparent
$\beta_{app}I$	°	Valeur moyennée sur une courte période de l'angle de vent apparent
$\epsilon_{\beta_{app}}$	°	Différence entre $\beta_{app}LT$ et $\beta_{app}I$

Glossaire

Abattre : modifier la direction du bateau de manière à l'écarter du lit du vent (contraire de lofer).

ADC : Analog-to-Digital Converter, montage électronique dont la fonction est de traduire une tension analogique en une valeur numérique.

Adonner, adonnante : changement de direction d'un flux qui tourne de l'avant vers l'arrière d'un profil. Évolution favorable à l'évolution du bateau. (C'est le contraire de refuser, voir ce mot).

Aérien : désigne à la fois le capteur girouette et anémométrique qui permettent de mesurer le vent.

AHRS : Attitude and Heading Reference System, dispositif permettant de déterminer en plus de l'orientation comme une IMU, la direction du Nord, magnétique ou géographique.

Allongement : rapport de la hauteur de la voile au carré de sa surface.

Allure : direction de la route par rapport au vent (exemples : près, large, vent arrière).

Amure : position d'un bateau par rapport au vent. Bâbord amures quand le bateau reçoit le vent par bâbord (gauche) ou tribord amures quand il le reçoit par tribord (droite).

Angle de finesse maximale : angle pour lequel le profil est placé suivant son meilleur ratio portance/trainée.

Angle d'incidence ou incidence : angle formé entre la corde du profil et le vent apparent (ou vent incident). On parle aussi de flux incident.

Angle d'ouverture ou ouverture : angle formé entre la corde du profil et l'axe du bateau. On ouvre la voile lorsqu'on éloigne son point d'écoute de l'axe du bateau.

Angle de remontée : au près, angle formé entre la route du voilier et le lit du vent.

Ardent : caractérise un voilier qui tend à lofer, à remonter dans le vent de lui-même (contraire : mou).

Bôme : espar articulé à la base du mât qui permet de maintenir et d'orienter la grand-voile.

Bord d'attaque : extrémité du profil qui pénètre en premier dans l'écoulement (côté guidant, pour une voile).

- Bord de fuite** : extrémité du profil par laquelle s'échappe l'écoulement (côté chute, pour une voile).
- Bordure** : limite inférieure d'une voile (voir guindant et chute).
- Cambrure** : mesure de la courbure d'un profil.
- Centre de dérive** : point d'application de la résultante des forces antidérive.
- Centre vélique** : point d'application de la poussée vélique, résultante de toutes les forces aérodynamiques qui s'appliquent à la voile.
- Chute** : lisière de bord de fuite d'une voile.
- Cible (vitesse & angle)** : valeurs correspondant au meilleur rendement de VMG.
- CNC** : dans la définition anglo-saxonne de machine-outil à commande numérique.
- Corde de profil** : pour une voile (ou un mât-aile), segment de droite reliant le bord d'attaque au bord de fuite.
- Déclinaison (magnétique)** : pour une localité donnée, angle entre la direction du pôle Nord géographique et le Nord Magnétique.
- Déviaton (magnétique)** : angle de modification du champ magnétique terrestre par le champ magnétique local induit par l'environnement (bateau et équipements).
- Dégauger** : le déjaugage est un changement de régime de l'avancement d'un objet dans l'eau, d'un régime " archimédien " à un régime dynamique où sa vitesse lui permet d'être porté par la surface de l'eau.
- Décollement** : se produit quand les lignes de courant orientées s'écartent de la paroi pour laisser la place à une zone d'air mort.
- DVL** : Doppler Velocity Log, est un instrument de mesure du vecteur déplacement de la masse d'eau par ondes acoustiques.
- Écoulement attaché** : lorsque les lignes de courants suivent la courbure d'un profil.
- Écoulement décollé** : lorsque les lignes de courants ne suivent plus la courbure d'un profil.
- Écoulement laminaire** : lignes de courant orientées, non perturbées, non mélangées entre elles.
- Écoulement perturbé** : écoulement mal orienté, non canalisé, désorganisé, à l'image des dépressions atmosphériques.
- Écoulement turbulent** : lignes de courant agitées, mélangées, mais prises dans un flux orienté.
- Écoulement uniforme** : caractérise l'écoulement en amont d'une voile, alors que les lignes de courant sont encore parallèles.
- Effet de plaque** : paroi empêchant le contournement des flux sur l'extrémité d'un plan porteur (le pont du bateau pour un génois).

- EKF** : Extended Kalman Filter, version non-linéaire du filtre de Kalman.
- Espar** : élément participant à la tenue des voiles : mât, bôme...
- Estime (navigation à)** : technique qui consiste à déduire une position en fonction de l'évolution des vitesses et directions depuis la dernière position connue.
- Extrados** : côté du profil sous le vent de l'écoulement général. Pour une voile, c'est normalement le côté convexe (contraire intrados, voir ce mot)
- Faseyement** : mouvement alternatif d'une voile dans le vent, plus particulièrement vers la chute (à la manière d'un drapeau).
- Fetch** : distance horizontale parcourue par le vent sur la mer sans avoir rencontré d'obstacle. Caractérise la formation des vagues.
- Finesse** : rapport entre portance et traînée d'un profil.
- Flèche (d'un profil)** : distance entre la corde et le sommet de la ligne moyenne du profil.
- Foil** : profil placé dans l'eau produisant une force portante permettant de soulever partiellement ou totalement le bateau de la surface de l'eau.
- Foiler** : non donné aux bateaux équipés de foils leur permettant de soulever entièrement ou partiellement leur(s) coque(s) de l'eau.
- Force vélique** : résultante de toutes les forces de surpression et de dépression relatives qui s'exercent sur une voile.
- Force de dérive** : composante de la force vélique perpendiculaire à la direction d'avancement du bateau.
- Force propulsive** : composante de la force vélique parallèle à la direction d'avancement du bateau.
- GeoSpeed** : variable de performance caractérisant la vitesse sur le fond suivant la distance parcourue vers une position donnée.
- Gîte** : inclinaison latérale du voilier.
- GNSS** : Global Navigation Satellite System, est le terme générique pour désigner un système de positionnement par satellite artificiels, (GPS, GONASS,...).
- Gradient** : ici, variation de vitesse ou de pression en fonction de la distance.
- Grément** : ensemble des pièces fixes et mobiles permettant l'établissement des voiles.
- GyroPilote** : désigne le pilote automatique nke d'entrée de gamme.
- IMOCA** : association de classe qui gère les monocoques Open de 60 pieds. Souvent utilisé pour désigner un bateau respectant cette jauge.
- IMU** : Inertial Measurement Unit, instrument capable d'intégrer les mouvements d'un mobile pour estimer son orientation.
- Incidence ou angle d'incidence** : angle que forme le vent apparent (ou vent incident) avec la corde d'un profil, éventuellement de la voile.

- Intrados** : côté du profil au vent de l'écoulement général. Pour une voile, c'est normalement le côté concave (contraire d'extrados, voir ce mot).
- J80** : petit monocoque habitable orienté course-croisière. Monotype de 8m apprécié lors de régates en baie.
- Kurtosis** : élément statistique caractérisant l'aplatissement d'une distribution.
- Ligne de foi** : axe longitudinal du navire.
- Lit du vent** : direction vers laquelle souffle le vent.
- Lofer** : se rapprocher du lit du vent (partir au lof : lofer brutalement, et souvent involontairement).
- MEMS** : Micro Electro-Mechanical Systems, microsystème comprenant un ou plusieurs éléments mécaniques, dans le cadre de notre application ; gravés dans le silicium pour faire des capteurs inertiels, gyroscopiques et magnétiques.
- MIPS** : Million d'Instructions Par Secondes.
- Molle** : zone du plan d'eau où le vent y est plus faible.
- Mou** : caractérise un voilier qui a tendance à abattre ; à descendre dans le vent de lui-même (contraire : ardent, voir ce mot).
- Navigation en finesse** : allure où il est possible de maintenir un écoulement non décollé sur l'extrados des voiles. En général, on navigue en finesse du près jusqu'au vent de travers (et un peu au-delà).
- Navigation en poussée** : allures portantes où l'écoulement est entièrement tourbillonnaire sur l'extrados des voiles (grand-largue ou vent arrière).
- Overspeed** : Comportement du moulinet qui l'entraîne à surestimer la vitesse moyenne d'un vent oscillant en intensité.
- Penon** : ruban ou brin de laine placé des deux côtés d'une voile et sur sa chute, pour contrôler l'écoulement des flux.
- Pilote HR** : désigne le pilote automatique nke de performance, disposant d'une centrale inertielle 9 axes et d'algorithmes avancés.
- Plan antidérive** : plan porteur sous-marin destiné à empêcher le dérapage latéral du voilier (ce peut être une quille ou une dérive).
- Polaire de carène** : courbe donnant la vitesse d'un voilier suivant l'allure, la force du vent et les voiles gréées.
- Portance** : composante de la force vélique perpendiculaire à l'écoulement général et à la traînée (force de sustentation pour l'aile d'avion).
- Près** : allure permettant de gagner dans le vent, plus ou moins près du lit du vent.
- Pulsation naturelle** : pulsation non amortie d'un système du second ordre. Fréquence à laquelle oscillerait le système sans son amortissement.

Pulsation propre : pseudo-période à laquelle le système du second ordre oscille.

Quillard : se dit d'un bateau dont le lest est placé en bout de quille.

RAO : pour Response Amplitude Operator, c'est la fonction de transfert du navire à une excitation des vagues sur un axe donné.

Refuser, refusante : changement de direction d'un flux qui tourne de l'arrière d'un profil vers l'avant (c'est le contraire d'adonner, voir ce mot).

Relancer : ensemble d'actions permettant de retrouver rapidement la vitesse d'origine du bateau.

Reynolds (nombre de) : rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses. Il permet de caractériser la nature de l'écoulement (laminaire, turbulent,...).

Roulis : oscillations transversales du voilier (à cause des vagues, du déplacement des équipiers ou de l'action du vent sur les voiles au portant).

Safran : partie immergée du gouvernail.

Sillage : perturbation que laisse derrière lui un corps placé dans un écoulement (sillage d'une voile) ou un corps en mouvement (sillage d'un bateau).

Skewness : élément statistique caractérisant l'asymétrie d'une distribution.

SPI : abréviation de spinnaker, voile hissée à l'avant du bateau lorsque le vent souffle depuis l'arrière.

Speedomètre : dispositif installé sur les bateaux afin d'en mesurer la vitesse de déplacement par rapport à la surface de l'eau.

Surface mouillée : partie immergée de la coque et des appendices (quille, safran, etc.).

ULTIME : désigne un trimaran dont la longueur est supérieure à 100 pieds, 30 mètres.

Upwash : déflexion des lignes de courant au dessus de la voile créée par la portance générée par cette dernière.

Veine (soufflerie) : partie exploitable pour effectuer des expériences dans la soufflerie.

Vitesse terminale : vitesse atteinte par un objet en chute libre lorsque la résistance du fluide compense son poids.

Sommaire

1.1	Contexte & Motivations	3
1.2	Le vent sur un bateau	5
1.2.1	La mécanique du voilier	5
1.2.1.1	Propriétés des fluides	5
1.2.1.2	Équilibre aéro/hydrodynamique	8
1.2.2	Le triangle de vent	10
1.2.2.1	Le vent réel	10
1.2.2.2	Le vent vitesse	11
1.2.2.3	Le vent apparent	11
1.2.2.4	Le courant	12
1.2.2.5	La dérive	12
1.2.3	Formules de construction du triangle de vent	16
1.2.3.1	Vent réel	16
1.2.3.2	Rétro calcul du vent apparent	16
1.2.4	Dérivées partielles	17
1.2.4.1	Application numérique	18
1.2.4.2	Dérivation des fonctions composées	19
1.3	La perturbation de la mesure	21
1.3.1	Les mouvements du bateau	21
1.3.1.1	La réponse statique	21
1.3.1.2	La réponse dynamique	23
1.3.2	Emplacement de l'aérien	24
1.3.3	La couche basse de l'atmosphère	26
1.3.3.1	Le profil vertical	27
1.3.3.2	Le poids de l'air	29
1.3.4	La mesure depuis l'extérieur	30
1.4	Performance et outils au service de la performance	33

1.4.1	Polaire de vitesse & <i>VMG</i>	34
1.4.1.1	Comment lire une polaire de vitesse	34
1.4.1.2	Le <i>VMG</i> à différentes allures	36
1.4.1.3	<i>VMC</i> / <i>GMG</i>	37
1.4.2	Centrales de navigation	38
1.4.2.1	Les Capteurs	39
1.4.2.1.1	Aériens	40
1.4.2.1.2	Speedomètres	40
1.4.2.1.3	Compas	42
1.4.2.1.4	GPS	43
1.4.2.1.5	Autres types de données à mesurer	44
1.4.2.2	L'algorithmie	45
1.4.2.3	Les afficheurs	46
1.4.2.4	Les actionneurs	46
1.5	Conclusion	47

Avant-Propos

Ce manuscrit faisant référence à des termes spécifiques au monde de la voile, il est recommandé de commencer la lecture par le [glossaire](#) et la [nomenclature](#).

1.1 Contexte & Motivations

nke Marine Electronics est le leader Français de l'équipement électronique pour les voiliers. Fondée en 1982, l'entreprise conçoit du matériel destiné principalement aux plaisanciers avertis et aux compétiteurs, notamment les solitaires via l'offre de pilotage automatique. La philosophie de l'entreprise étant de proposer des produits à la pointe de l'innovation, il lui est nécessaire de fournir un effort permanent de recherche pour satisfaire le degré d'exigence de ses clients, mais aussi pour suivre l'évolution technologique du nautisme dans son ensemble.

Une thèse CIFRE semblait être un bon moyen de continuer à innover. Le dossier a été monté conjointement entre l'entreprise nke et le doctorant suite à une première collaboration lors de la dernière année d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur, qui s'est effectuée à 3/4 temps dans l'entreprise via un contrat de professionnalisation. La sélection du sujet et l'élaboration du dossier a été faite sous les conseils de Frédéric Hauville et Patrick Bot du laboratoire IRENav de l'École Navale. L'IRENav assurant le co-encadrement de cette thèse, justifié par leur expertise en dynamique des fluides. L'encadrement est quant à lui assuré par le laboratoire Lab-STICC de l'UBS, expert dans les systèmes embarqués et le traitement du signal. En plus des compétences techniques du Lab-STIIC, leur association à ce sujet de thèse a été motivée par leur première expérience réussie dans l'encadrement par Johann Laurent de sujets spécifiques au monde de la voile.

Le moteur d'un voilier étant le vent, savoir le mesurer est alors primordial pour l'exploiter de façon optimale. Les travaux sur ce sujet ont toujours été d'actualité chez nke, et bien que la qualité de la mesure du vent soit acceptable pour la plupart des plaisanciers, l'entreprise sait qu'il reste encore beaucoup de problématiques à résoudre pour satisfaire le degré de précision demandé par ses clients professionnels. L'objectif de cette thèse est donc de trouver des solutions pour améliorer significativement la qualité et la précision du vent mesuré et calculé à bord des voiliers. Le but premier est de satisfaire à la précision demandée par les utilisateurs, mais également de fournir aux algorithmes du pilote automatique de la marque des données de meilleure qualité. Enfin, l'entreprise souhaite explorer si de nouveaux algorithmes de pilotage automatique pourraient tirer partie des améliorations sur la donnée vent.

Le manuscrit s'organise en 5 chapitres : le 1^{er} explique le contexte et les problématiques associées en donnant des pistes de résolution. Le 2nd chapitre se concentre sur la partie acquisition et traitement de la mesure. Le 3^{ème} chapitre concerne les problématiques de

reconstruction du vent réel, et le 4^{ème} chapitre traite des améliorations et innovations apportées au pilote automatique. Enfin, le dernier chapitre conclura sur les travaux menés au cours de cette thèse et posera quelques pistes de recherche à explorer.

1.2 Le vent sur un bateau

Afin de comprendre quels sont les obstacles présents lorsque l'on cherche à mesurer le vent depuis un voilier, il est primordial d'avoir une vision d'ensemble de la problématique. C'est ce que nous allons voir dans ce 1^{er} chapitre et cette section, en exposant quels sont les mécanismes entrant en jeu lorsqu'un bateau navigue à l'interface atmosphère-eau.

1.2.1 La mécanique du voilier

Nous allons nous intéresser aux phénomènes permettant à un bateau de remonter au vent et de se déplacer jusqu'à trois fois la vitesse de celui-ci.

1.2.1.1 Propriétés des fluides

Le voilier interagit avec l'élément fluide via ses profils, voiles pour l'air et appendices (quille, dérives, safrans) pour l'eau. Le principe d'interaction entre les voiles et l'air ou bien les appendices et l'eau est identique. Ce qui change fondamentalement le résultat, sont les caractéristiques différentes de l'air et de l'eau ; principalement la masse volumique, $1,204\text{kg}/\text{m}^3$ pour l'air à 20°C contre $1000\text{kg}/\text{m}^3$ pour l'eau à 4°C , soit un rapport 830. Et la viscosité dynamique, $1,03 \times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$ pour l'eau contre $1,8 \times 10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s}$ pour l'air. L'autre grande différence de l'air par rapport à l'eau est sa compressibilité, qui joue un rôle important dans les problématiques de cavitation des appendices à vitesses élevées, mais dans le cadre des phénomènes étudiés au niveau macro dans cette thèse, cette propriété n'est pas nécessairement à prendre en compte pour la compréhension de la dynamique des fluides.

La génération d'une force sur un profil peut s'effectuer de deux manières :

- Avec un écoulement turbulent,
- Avec un écoulement laminaire.

Lorsque l'écoulement n'est pas perturbé et que les lignes de courant sont continues, l'écoulement est laminaire. Lorsqu'il est perturbé, on dit qu'il est turbulent. Cette transition peut être caractérisée par le nombre de Reynolds qui se définit ainsi :

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (1.1)$$

C'est un nombre sans dimension, on considère que lorsqu'il est supérieur à 2300, l'écoulement est turbulent. Avec

- V , la vitesse caractéristique du fluide en m/s .
- L , la dimension caractéristique (diamètre d'un tuyau ou corde d'un profil) en m .

- ρ , la masse volumique du fluide en kg/m^3 .
- μ , la viscosité dynamique du fluide en $Pa.s$ (caractérise le gradient).

Comme pour l'air et l'eau ρ et μ sont très différents (rapport 830 et 60). Alors, pour une même vitesse d'écoulement V , si l'on veut rester en régime laminaire, il faut jouer sur L la taille du profil. C'est une des raisons pour laquelle les profils immergés des bateaux sont plus petits que les voiles. La deuxième raison vient de la force générée sur les profils.

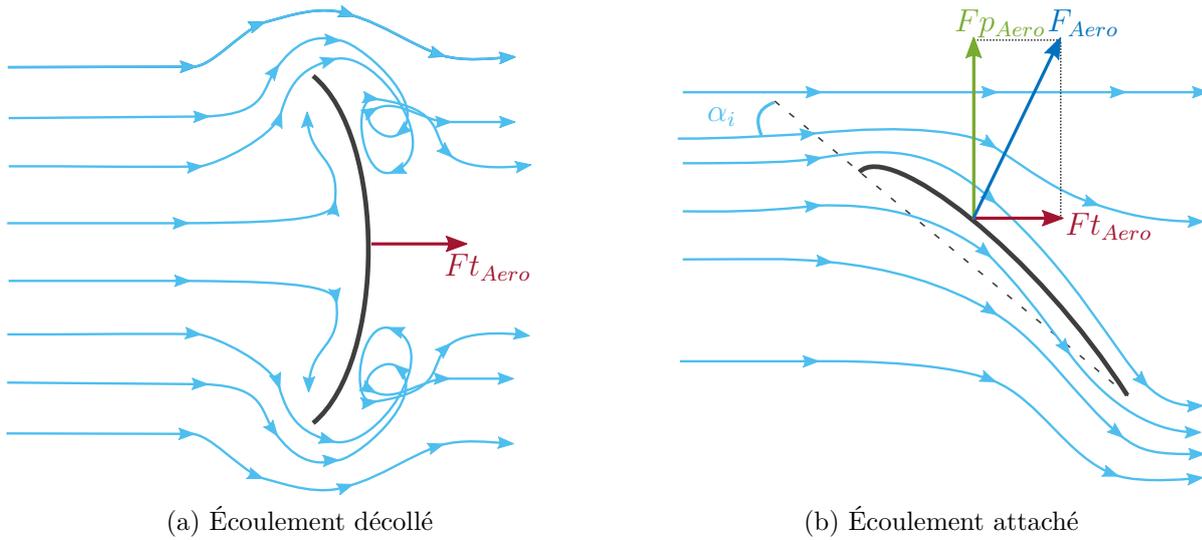


FIGURE 1.1 – Comparaison des forces produites par un profil utilisé uniquement en écoulement décollé et un autre en régime d'écoulement attaché. Les deux ont une traînée aérodynamique Ft_{Aero} mais seul le régime d'écoulement attaché permet la génération d'une force de portance Fp_{Aero} . La résultante de ces deux composantes F_{Aero} n'est alors plus orientée dans le sens du flux.

La Figure (1.1) montre la différence de force produite par le fluide sur le profil lorsque l'écoulement est attaché ou non.

L'équation (1.2) définit la force exercée par le fluide en mouvement sur un profil quelconque :

$$F_i = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_i \quad (1.2)$$

Avec :

- S , surface de référence : lorsque le profil travaille en finesse (Figure (1.1b)), c'est la surface de l'appendice. Lorsque le profil travaille en poussée (Figure (1.1a)), c'est la surface frontale opposée à l'écoulement, en m^2 .
- V , la vitesse caractéristique du fluide en m/s .
- ρ , la masse volumique du fluide en kg/m^3 .
- C_i , le coefficient d'effort i , portance ou traînée, qui dépend du profil.
- i , la direction de l'effort par rapport à l'axe d'écoulement du fluide. t dans le flux et

p perpendiculairement au flux.

À l'origine de la navigation à voile, les bateaux n'étaient pas capables de remonter au vent, ils utilisaient de grandes voiles en régime décollé, Figure (1.1a). Dans ce cas, seul le coefficient de traînée C_t rentre en compte. C'est lui qui caractérise la résistance opposée au vent par le profil. Contrairement au monde de l'automobile où l'on cherche à le rendre le plus faible possible $C_t \simeq 0,25$, il faut le maximiser pour les voiles de portant afin de récupérer le plus de traction possible (pour un spi symétrique : $1.17 < C_t < 1.42$ [Hoerner, 1965]).

Puis, par l'utilisation de profils minces, Figure (1.1b), on a réussi à générer une composante perpendiculaire à la direction de déplacement du vent apparent, F_p . Cela permet d'orienter la force générée par le vent dans une autre direction que son sens de déplacement.

Sans rentrer des les détails aérodynamiques, il est intéressant d'expliquer que le coefficient

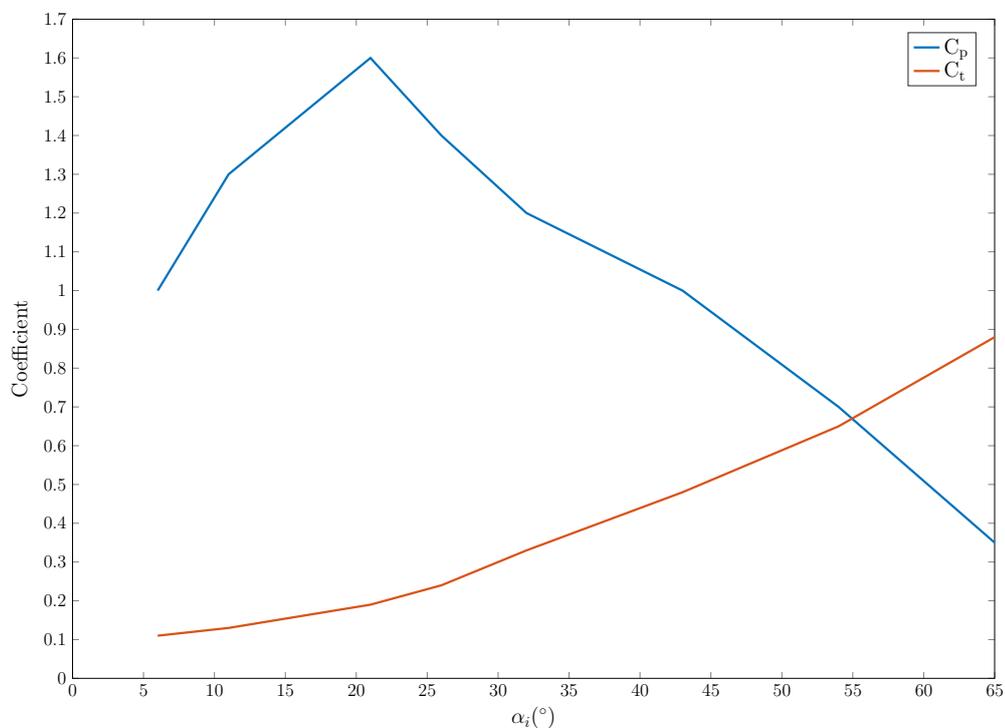


FIGURE 1.2 – Évolution des coefficients de portance et de traînée d'une voile en fonction de l'angle d'incidence.

de portance d'une voile C_p et son coefficient de traînée C_t , ne sont pas constants mais varient en fonction de l'angle d'incidence du profil, α_i . Il s'agit de l'angle entre la corde du profil et la direction du vent subie par ce profil, β_{eff} . La Figure (1.2) montre leur évolution. On voit que le coefficient de portance C_p atteint un maximum avant de décroître, alors que le coefficient de traînée C_t augmente continuellement. On comprend ainsi que la performance aérodynamique d'une voile va dépendre de cet angle d'incidence α_i . Ces mêmes notions sont applicables à n'importe quel profil aérodynamique et entreront en compte lorsque nous nous

intéresserons aux capteurs.

La Figure (1.3) représente les coefficients de portance et traînée sous forme de polaire. Avec cette représentation, la distance de chaque point à l'origine correspond à la résultante des deux coefficients. Plus le module est élevé, plus la force vélique est importante. Toutefois, il est intéressant de regarder l'orientation de cette résultante. On remarque sur cette figure que pour un angle d'incidence α_i de 20° on obtient un maximum ; nous essaierons donc de régler notre voile à cet angle d'incidence afin de maximiser la force vélique.

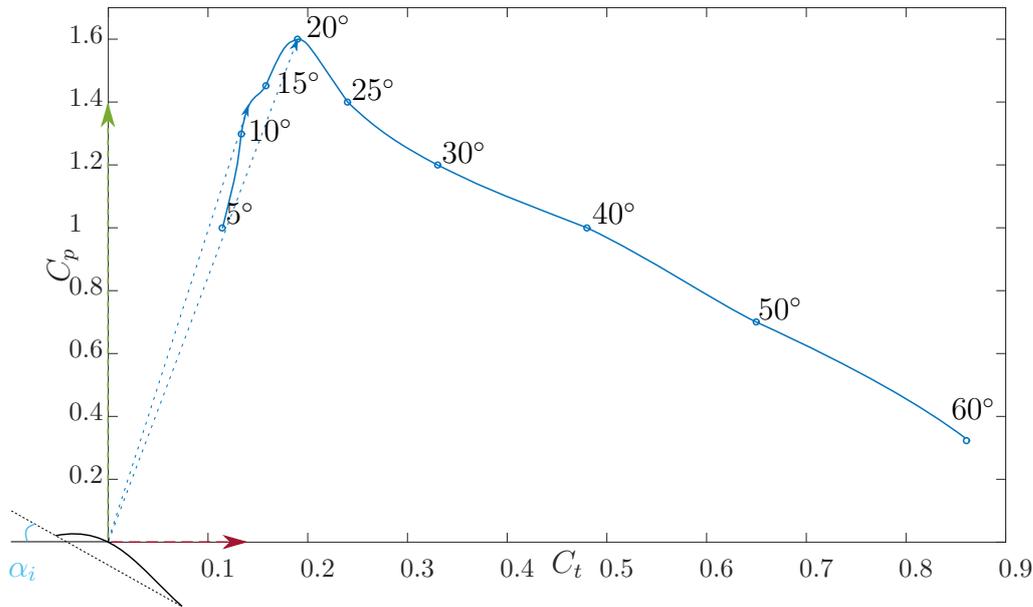


FIGURE 1.3 – Coefficients $C_p C_t$ représentés sous forme de polaire. Le premier vecteur tangent à la courbe représente le meilleur ratio de finesse C_p/C_t . C'est à cet angle d'incidence $\alpha_i = 13^\circ$, que le rendement de la voile est optimal. Le second vecteur représenté pour $\alpha_i = 20^\circ$, est celui qui maximisera la portance. Lorsque l'on a besoin de puissance, comme par exemple dans les vagues au près ou bien au large, on cherchera à se rapprocher de l'angle d'incidence qui maximise la portance plutôt que celui qui offre la meilleure finesse.

Les valeurs sur les Figures (1.2) et (1.3) sont dépendantes du type de voile, (voile d'avant, grand voile), de la forme générale de la voile ainsi que de l'emplacement du creux dans celle-ci, mais la forme générale des courbes et leur évolution restent similaires.

1.2.1.2 Équilibre aéro/hydrodynamique

Nous venons de voir les forces de portance et de traînée appliquées aux voiles. Pour se déplacer dans une autre direction que celle du vent, il faut opposer aux efforts aérodynamiques une force anti-dérive. Cette force hydrodynamique F_{Hydro} est créée selon le même principe

que F_{Aero} , (équation (1.2)), mais avec des profils prenant appui dans l'eau.

Lorsque F_{Aero} s'applique, le bateau accélère en prenant appui sur ses plans anti-dérive jusqu'à ce que la composante hydrodynamique F_{Hydro} compense exactement les efforts aérodynamiques, voir Figure (1.4).

Pour que l'équilibre soit respecté, il faut que F_{Aero} et F_{Hydro} soit colinéaires. Si, par exemple, la traînée hydrodynamique F_{tHydro} diminue parce que le bateau déjauge, alors F_{Hydro} va s'orienter vers l'avant et le bateau va accélérer jusqu'au prochain équilibre.

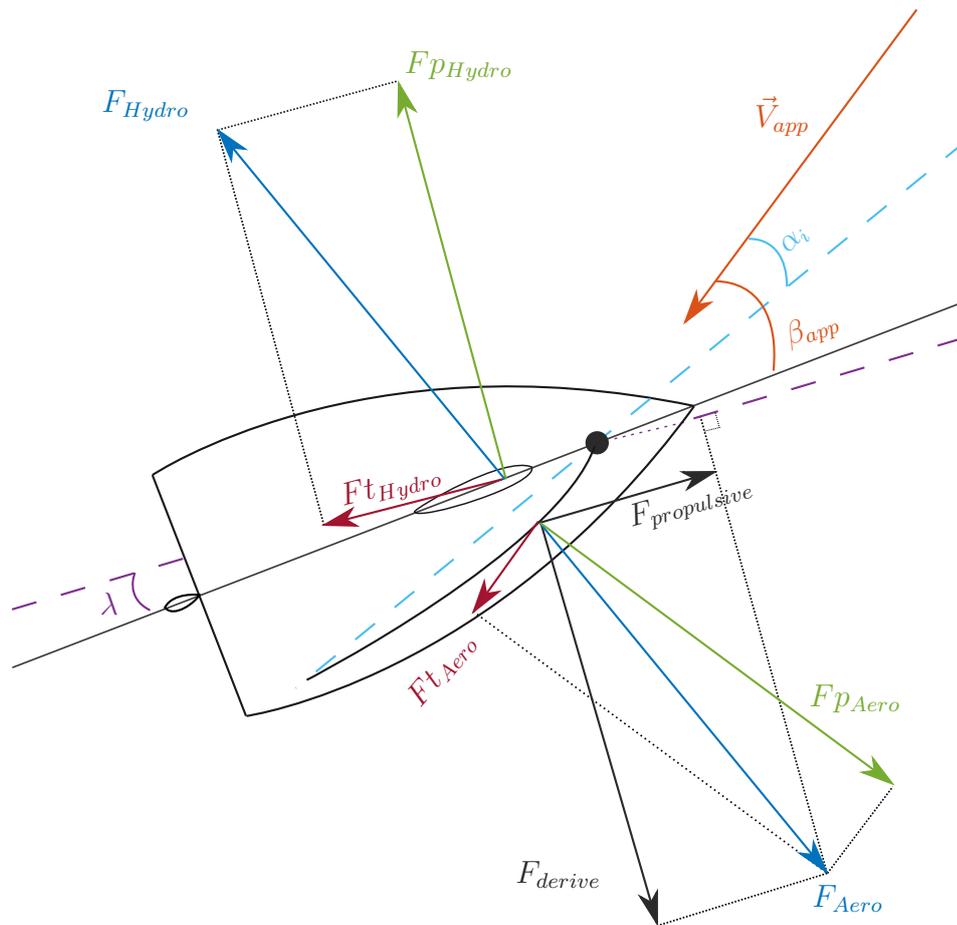


FIGURE 1.4 – Schéma à l'équilibre des résultantes des forces aérodynamiques et hydrodynamiques en présence sur un voilier.

Maintenant que nous maîtrisons les concepts des forces générées par le vent sur les voiles, il faut s'intéresser à ceux concernant la structure de ce vent.

1.2.2 Le triangle de vent

Du fait que le bateau se déplace dans et grâce au vent, il faut différencier et définir les différents vents que nous allons rencontrer sur un bateau.

Dans un souci de compréhension et de normalisation, les définitions sont dans un premier temps exposées en 2 dimensions, mais nous verrons plus loin dans le manuscrit que pour appréhender tous les phénomènes il faut définir le vent en 3 dimensions. Cette méthode de conceptualisation dans le plan est couramment appelée *triangle de vent*.

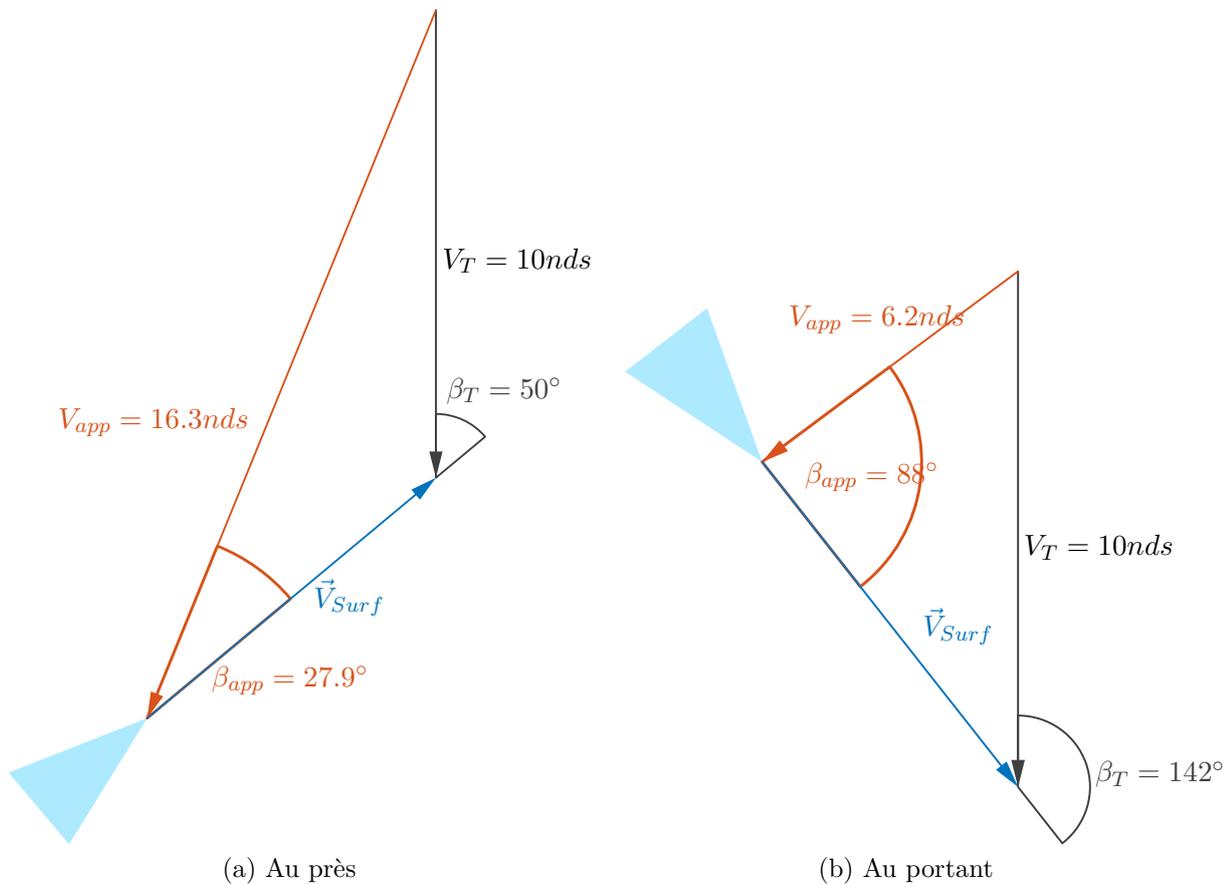


FIGURE 1.5 – Triangles de vent en fonction de l'allure, pour une vitesse de déplacement fixe $V_{Bs} = 8 \text{ nds}$.

1.2.2.1 Le vent réel

Dans le milieu du nautisme, ce que l'on appelle le vent réel, noté \vec{V}_T , correspond au vent météo, c'est-à-dire, le vent ressenti par un observateur immobile sur la rive, ou encore par un marin lorsque son voilier est au mouillage.

C'est une information capitale, car les références de performance du bateau ou encore les choix

de routes dépendent de sa force ainsi que sa direction. Malheureusement, il est impossible de mesurer directement le vent réel depuis un mobile. Résoudre le triangle de vent consiste alors à déterminer l'angle et la vitesse de vent réel β_T et V_T à partir des vecteurs mesurables ou estimables avec les capteurs à disposition, à savoir le vecteur de déplacement du bateau \vec{V}_{Surf} et le vent apparent \vec{V}_{app} .

La direction du vent réel Θ_T est ensuite obtenue en faisant la somme de l'angle de vent réel et du cap du bateau α . La Figure (1.5) montre deux exemples de cette composition vectorielle. Pour cet exemple à deux allures différentes, bien que le vecteur \vec{V}_{app} soit différent, le vent réel, lui, n'a pas bougé.

1.2.2.2 Le vent vitesse

À partir du moment où le bateau n'est plus immobile, il existe un concept appelé *vent vitesse*, de magnitude identique à notre vitesse de déplacement et de direction opposée. C'est pourquoi en l'absence totale de vent réel, lorsque le bateau se met à avancer, on y ressent un vent de face. Ou bien, lorsque le navire se dirige dans la même direction que le vent réel, si il se déplace à la même vitesse, alors une personne à bord ne ressentira plus de vent.

Le vent vitesse est construit à partir de la vitesse de déplacement du bateau V_S , mesurée par un speedomètre et de sa direction, déterminée à l'aide du compas.

1.2.2.3 Le vent apparent

Le vent apparent est la combinaison du vent réel et du vent vitesse. Lorsque l'on se place dans le référentiel bateau, c'est le seul vent ressenti et donc le seul mesurable.

C'est aussi le vent qui agit sur les voiles et génère la force aérodynamique F_{Aero} . On est donc dans un système couplé : la modification de α_i par le réglage de l'écoute ou le changement du cap du bateau va modifier F_{Aero} , et donc la vitesse du bateau V_S . Ceci va modifier le vent vitesse et donc le vent apparent. À son tour, ce dernier va lui même influencer sur α_i et ainsi de suite jusqu'au nouvel équilibre F_{Aero}/F_{Hydro} . Cet équilibre va tenir jusqu'à la prochaine perturbation du vent apparent, pouvant aussi venir d'une modification du vent réel.

La Figure (1.5) montre que pour un vent réel et une vitesse de déplacement V_{Bs} identique, lorsque l'allure est différente (β_T) : le vecteur \vec{V}_{app} n'est pas identique entre le près (1.5a), et le portant (1.5b). Le vent apparent est donc dépendant de l'allure du bateau.

Du fait que le vent apparent soit une combinaison du vent réel et du vent vitesse, et que celui-ci agit sur les voiles, plus le bateau accélère, plus il crée de vent vitesse. Ce même vent vitesse va être utilisé pour créer F_{Aero} . Ainsi plus le bateau va vite, plus il a de puissance disponible. Si la traînée hydrodynamique reste faible, ou augmente moins vite que sa traînée aéro, alors plus le bateau va vite, plus il accélère. De ce fait, certains bateaux qui arrivent à

réduire leur traînée hydrodynamique en planant ou bien en utilisant des foils, sont capables d'aller plus vite que le vent (réel).

À la manière d'une personne marchant sur un tapis roulant, le bateau évolue à la surface de l'eau. Il faut donc tenir compte de ce changement de référentiel, causé par le courant de surface, lors du calcul du vent réel.

1.2.2.4 Le courant

Jusqu'à présent, nous avons considéré qu'il n'existe qu'un seul vent réel. En réalité, il faut différencier le vent réel surface $\vec{V}_{T_{Surf}}$ du vent réel fond $\vec{V}_{T_{Ground}}$.

Le bateau se déplaçant à la surface de l'eau, celui-ci subit les mouvements de surface dus au courant. Tout comme le vent apparent est influencé par le vent vitesse, la vitesse relative du référentiel surface R_{Surf} par rapport au référentiel fond R_{Ground} est fonction du courant marin. Le bateau étant placé dans le référentiel R_{Surf} , on parlera de vent réel surface, mais le vent synoptique, donné par la météo, est lui exprimé dans le référentiel R_{Ground} . Tout comme existe le concept de vent vitesse, on peut parler de "vent courant".

La Figure (1.6) montre l'effet sur le vent réel surface $\vec{V}_{T_{Surf}}$ lorsque le bateau navigue avec du courant traversier. Pour calculer le vent fond $\vec{V}_{T_{Ground}}$, le vent subit par un observateur immobile par rapport au sol, il faut utiliser le vecteur de déplacement par rapport au fond, formé par la *SOG* (Speed Over Ground) et la *COG* (Course Over Ground). Ce vecteur est facile à obtenir car il est fourni par un seul capteur réputé fiable, le récepteur GNSS.

Il est intéressant de noter qu'entre les deux schémas (1.6a) & (1.6b), la vitesse de déplacement surface V_{Bs} et la direction du bateau relative au vent fond sont identiques. Ce qui, par le jeu de construction vectorielle, induit un changement dans le vent apparent et le vent réel surface.

En pratique, lorsque le bateau passe de la Figure (1.6a) vers une zone avec du courant comme sur la Figure (1.6b), la sensation est que le vent réel tourne à droite, qu'il refuse. Si le barreur n'agit pas sur sa trajectoire, alors la vitesse surface va décroître vers un nouvel équilibre F_{Aero}/F_{Hydro} , tandis que dans le même temps, la vitesse par rapport au fond aura augmenté.

Tout comme le courant apporte de la complexité au triangle de vent, la dérive est une problématique à prendre en compte.

1.2.2.5 La dérive

Comme vu sur la Figure (1.4), pour que les profils aquatiques produisent une force anti-dérive, il faut qu'ils aient un angle d'incidence non nul avec le flux d'eau, λ . Ce flux étant généré par la vitesse d'avancement du bateau, cela veut dire que celui-ci ne peut pas

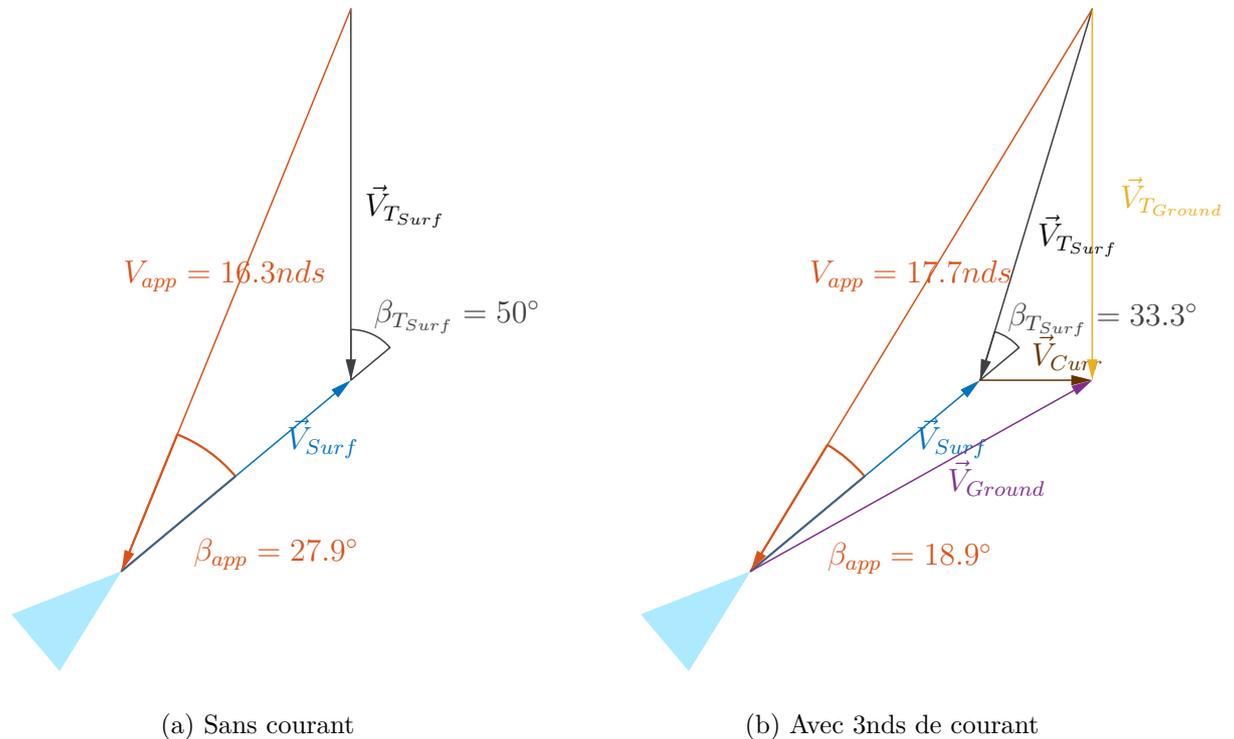


FIGURE 1.6 – Comparaison du vent réel surface et vent réel fond en fonction du courant.

avancer dans la direction de sa ligne de foi, car en général, les appendices sont symétriques et dans l'axe du bateau. Le bateau avance légèrement en crabe et fait une route surface de quelques degrés plus abattue. Cet angle est appelé l'angle de dérive.

Il est très compliqué de formaliser avec une équation cet angle de dérive puisque celui-ci dépend du type et de la forme des appendices, dérives symétriques/asymétriques. Il varie également avec la gîte et le désaxement du centre de carène qui se produit avec les bateaux ayant une poupe plus large que la proue, voir Figure (1.26).

Néanmoins, il existe une formule valable au près pour les bateaux sans dérives asymétriques [McCurdy et Pedrick, 1981] :

$$\lambda = \frac{K_\lambda \times \phi}{V_S^2} \quad (1.3)$$

K_λ étant un coefficient déterminé empiriquement, généralement compris entre 9 et 12, et ϕ l'angle de gîte du bateau. L'équation (1.3) nous montre le comportement général de l'angle de dérive λ : plus le bateau gîte, plus il dérive et inversement : plus il va vite, moins il dérive. (Voir l'équation de la portance d'un profil (1.2)).

Depuis 1981 et cette formule empirique, les avancées sur ce sujet ne sont pas vraiment concluantes. En 1987, Garrett [Garrett, 1987] suggère de l'estimer à la vue en observant le sillage du bateau, ou bien de placer des tubes de pitots à l'avant du bateau, ou encore

de placer une girouette immergée dans l'eau. Le détail des travaux effectués sur la mesure physique sera présenté dans le chapitre 3.

Garrett propose également une autre formule pour l'estimer, équation (1.4), en se basant sur le moment de redressement qui est fonction du sinus de la gîte, et non sur la gîte elle-même comme avec l'équation (1.3).

$$\lambda = \frac{K_\lambda \sin(\phi)}{V_S^2} \quad (1.4)$$

Prenons l'exemple d'un voilier aux performances classiques navigant au près à $6nds$ et gîtant de 20° . Le coefficient $K_{\lambda Pedrick}$ estimé à 10 donne :

$$\lambda = \frac{10 \times 20}{6^2} = 5,5^\circ \quad (1.5)$$

Le coefficient $K_{\lambda Garrett}$ correspondant, serait d'après (1.4) et (1.5) :

$$K_{\lambda Garrett} = \frac{\lambda V_S^2}{\sin(\phi)} = \frac{5,5 \times 6^2}{\sin(20)} = 578 \quad (1.6)$$

La Figure (1.7) reprend les valeurs de l'équation (1.5) et montre l'effet de la dérive sur le vecteur de déplacement surface V_{Bs} . Si la différence entre V_{Bs} et V_S reste faible, c'est surtout la vitesse de dérive V_λ , qui va avoir un effet important sur le calcul du vent réel et sur l'estime si elle n'est pas prise en compte.

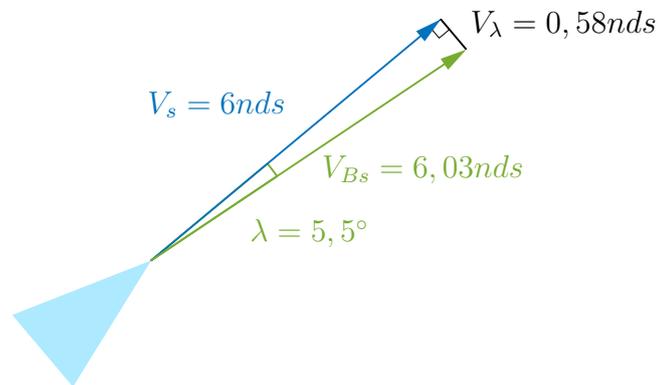


FIGURE 1.7 – Effet de la dérive sur la route surface. Ce schéma reprend l'application numérique de l'équation (1.5). Le bateau a une vitesse de déplacement longitudinale V_S égale à $6nds$. C'est cette vitesse qui est mesurée par le capteur speedomètre. L'angle de dérive, estimé pour cet exemple pour un bateau ayant de bonnes performances de remontée au vent, induit une vitesse de dérive latérale de $0,58nds$. La vitesse de déplacement surface du bateau V_{Bs} est alors supérieure à la vitesse mesurée par le capteur speedomètre.

La Figure (1.8) montre l'évolution de l'angle de dérive estimé λ , en fonction de la gîte du bateau pour 3 vitesses surface différentes, 5, 6 et $10nds$. Sont comparées l'estimation de

Pedrick d'après la formule (1.3), en lignes continues sur la figure, et l'estimation de Garrett d'après l'équation (1.3), en pointillés.

On remarque que les différences entre les deux approches sont faibles au regard de la précision que l'on peut attendre de ce type d'estimation. On préférera alors utiliser la méthode de Pedrick (1.3), plus simple, avec un ordre de grandeur de K_λ plus faible et avec une amplitude de variation réduite, donc plus facile à régler.

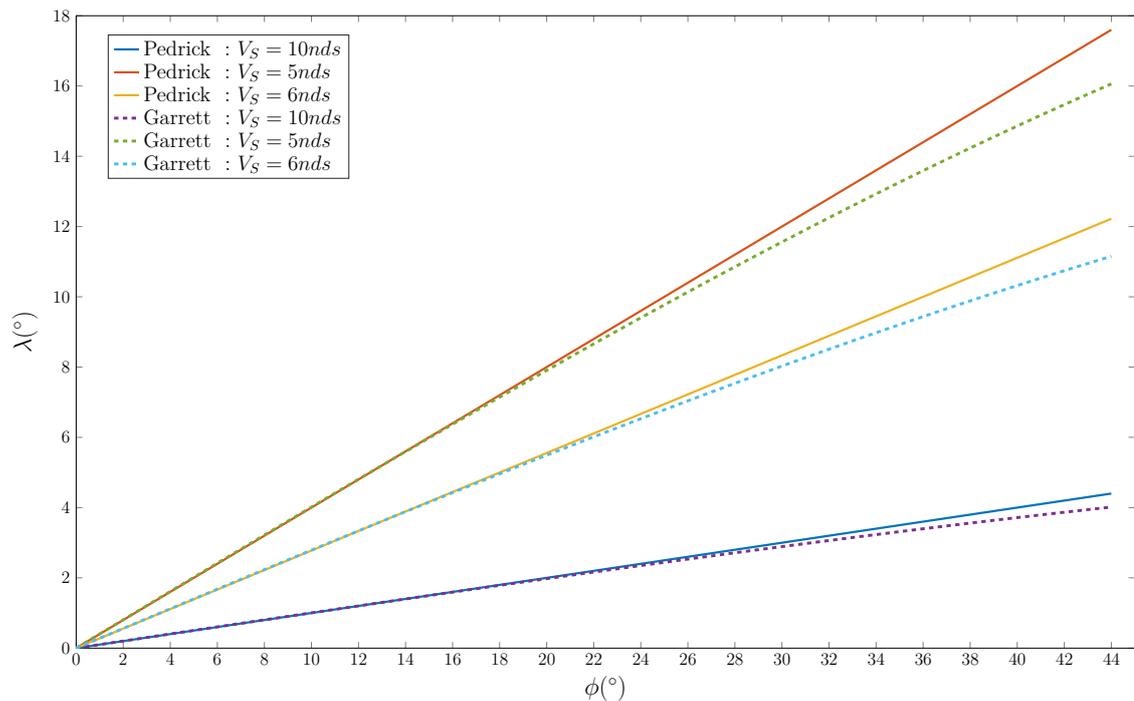


FIGURE 1.8 – Comparaison des méthodes d'estimation de la dérive par la formule de Pedrick et de Garrett.

Avec $K_{\lambda Pedrick} = 10$ et $K_{\lambda Garrett} = 578$.

En ce qui concerne la mesure physique de la dérive, le principal problème vient du fait qu'entre le vecteur vitesse surface, fourni par le speedomètre et le compas, et le vecteur de déplacement fond fourni par le récepteur GNSS, il existe deux inconnues : l'angle de dérive et le courant de surface. Toutes deux sont quasiment impossibles à mesurer via des instruments. Jusqu'à présent, l'estimation de la dérive est effectuée via cette formule, ou en combinaison de tables remplies manuellement. L'avancée la plus importante sur le sujet a été faite par [Douguet et Diguet, 2013], qui a associé la modélisation du problème dans un filtre prédictif avec un capteur de vitesse surface à deux dimensions DVL, pour Doppler Velocity Log. Ceci permet, une fois le filtre initialisé avec la formule empirique (1.3), d'estimer simultanément l'angle de dérive λ et le vecteur courant \vec{V}_{Curr} .

Maintenant que le concept de triangle de vent est défini, intéressons-nous aux équations utiles à sa construction :

1.2.3 Formules de construction du triangle de vent

Dans cette section, nous allons voir quels sont les liens entre les différentes données que l'on retrouve dans le triangle de vent. Bien que relevant essentiellement de problèmes trigonométriques, il est intéressant d'en faire la revue pour appréhender l'influence de chaque donnée sur l'ensemble de la construction.

1.2.3.1 Vent réel

Pour obtenir la vitesse et l'angle de vent réel à partir du vecteur \vec{V}_{app} et \vec{V}_{Surf} , on décompose le vecteur $\vec{V}_{T_{Surf}}$ en une composante longitudinale V_{Tc} et une autre transversale V_{Tt} :

$$V_{Tc} = V_{app} \cos(\beta_{app} + \lambda) - V_{Bs} \quad (1.7)$$

$$V_{Tt} = V_{app} \sin(\beta_{app} + \lambda) \quad (1.8)$$

L'angle et le module sont ensuite reconstitués comme suit :

$$\beta_T = \arctan\left(\frac{V_{Tt}}{V_{Tc}}\right) \quad (1.9)$$

$$V_T = \sqrt{V_{Tt}^2 + V_{Tc}^2} \quad (1.10)$$

Une autre solution pour obtenir la vitesse du vent réel sans passer par la décomposition vectorielle est d'utiliser le théorème d'Al-Kashi :

$$V_T^2 = V_{Bs}^2 + V_{app}^2 - 2 \cos(\beta_{app} + \lambda) V_{Bs} V_{app} \quad (1.11)$$

1.2.3.2 Rétro calcul du vent apparent

Nous verrons plus tard qu'il peut aussi être intéressant de faire le chemin inverse : de retrouver le vent apparent, à partir de l'information de vent réel. On peut alors procéder :

Par décomposition vectorielle : En définissant une composante transversale du vent apparent :

$$V_{At} = V_T \sin(\pi - \beta_T) = V_T \sin \beta_T \quad (1.12)$$

Et une composante longitudinale : (suivant la route surface du bateau (soit le cap +

l'angle de dérive))

$$V_{Ac} = V_{Bs} - V_T \cos(\pi - \beta_T) = V_{Bs} + V_T \cos \beta_T \quad (1.13)$$

Alors, à la manière du vent réel (1.9) et (1.10), l'angle et le module sont reconstitués comme suit :

$$\beta_{app} + \lambda = \arctan \left(\frac{V_{At}}{V_{Ac}} \right) \quad (1.14)$$

$$V_{app} = \sqrt{V_{At}^2 + V_{Ac}^2} \quad (1.15)$$

Une autre méthode consiste à utiliser le théorème d'Al-Kashi :

Par la loi des cosinus :

$$V_{app} = \sqrt{V_{Bs}^2 + V_T^2 - 2V_{Bs}V_T \cos(\pi - \beta_T)} = \sqrt{V_{Bs}^2 + V_T^2 + 2V_{Bs}V_T \cos \beta_T} \quad (1.16)$$

$$\beta_{app} = \arcsin \left(\frac{V_T}{V_{app}} \sin \beta_T \right) - \lambda \quad (1.17)$$

$$\beta_{app} = \arccos \left(\frac{V_{app}^2 + V_{Bs}^2 + V_T^2}{2V_{app}V_{Bs}} \right) - \lambda \quad (1.18)$$

Ces équations vont maintenant nous servir à quantifier la propagation des erreurs.

1.2.4 Dérivées partielles

Pour chiffrer la répercussion de l'évolution d'une variable, ou de l'erreur sur son estimation, nous utilisons la méthode des dérivées partielles.

L'influence d'une variation du vent apparent β_{app} sur l'angle de vent réel β_T , est définie à l'aide de la dérivée partielle suivante :

$$\frac{\partial \beta_T}{\partial \beta_{app}} = \frac{V_{app}^2 - V_{Bs}V_{app} \cos(\beta_{app} + \lambda)}{V_{Bs}^2 + V_{app}^2 - 2 \cos(\beta_{app} + \lambda)V_{Bs}V_{app}} \quad (1.19)$$

Dans le dénominateur de l'équation (1.19) on reconnaît la force de vent réel (1.11).

Alors, (1.19) se simplifie en :

$$\frac{\partial \beta_T}{\partial \beta_{app}} = \frac{V_{app}^2 - V_{Bs} V_{app} \cos(\beta_{app} + \lambda)}{V_T^2} \quad (1.20)$$

De même, la vitesse du vent apparent et la vitesse de déplacement surface sont des valeurs mesurées et influent sur la direction du vent réel suivant :

$$\frac{\partial \beta_T}{\partial V_{app}} = \frac{-V_{app} \sin(\beta_{app} + \lambda)}{V_T^2} \quad (1.21)$$

et

$$\frac{\partial \beta_T}{\partial V_{Bs}} = \frac{V_{app} \sin(\beta_{app} + \lambda)}{V_T^2} \quad (1.22)$$

En ce qui concerne la force du vent réel $V_{T_{surf}}$:

$$\frac{\partial V_T}{\partial \beta_{app}} = \frac{V_{Bs} V_{app} \sin(\beta_{app} + \lambda)}{V_T} \quad (1.23)$$

$$\frac{\partial V_T}{\partial V_{app}} = \frac{V_{app} - V_{Bs} \cos(\beta_{app} + \lambda)}{V_T} \quad (1.24)$$

$$\frac{\partial V_T}{\partial V_{Bs}} = \frac{V_{Bs} - V_{app} \cos(\beta_{app} + \lambda)}{V_T} \quad (1.25)$$

Il est maintenant intéressant de chiffrer avec un exemple.

1.2.4.1 Application numérique

La Figure (1.1) reprend les dérivées partielles de la section 1.2.4 et fait l'application numérique d'après les performances d'un monocoque 60" Imoca. Comme les dérivées partielles sont fonctions de plusieurs paramètres d'entrée, ceux-ci sont fixés pour des conditions de navigation usuelles. Pour un autre type de bateau, les résultats seront différents puisque leurs performances ne seront pas identiques mais la forme générale restera similaire.

On remarque sur la Figure (1.1a), que l'angle de vent apparent β_{app} a plus d'influence sur la direction du vent réel au près qu'au portant. Et que sur la Figure (1.1f), V_{Bs} n'influe pas sur β_T au vent de travers mais se répercute avec un ratio 1/1 face ou dos au vent.

β_t/V_t	5	10	15	20	25	30	
Près	30	1,5	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2
	40	1,7	1,6	1,5	1,3	1,3	1,2
	50	1,7	1,6	1,4	1,3	1,3	1,2
	60	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,2
	70	1,5	1,4	1,3	1,2	1,2	1,2
	80	1,3	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1
Travers	90	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	100	0,7	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9
	110	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7
	120	0,3	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6
	130	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5
	140	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
Portant	150	0,3	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3
	160	0,4	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4
	170	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5
	180	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6

(a) $\frac{\partial \beta_T}{\partial \beta_{app}}$ en $^\circ/^\circ$

β_t/V_t	5	10	15	20	25	30	
Près	30	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1
	40	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	50	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	60	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	70	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	80	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3
Travers	90	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
	100	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
	110	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4
	120	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4
	130	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
	140	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3
Portant	150	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
	160	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1
	170	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	180	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

(b) $\frac{\partial V_T}{\partial \beta_{app}}$ en nds/ $^\circ$

β_t/V_t	5	10	15	20	25	30	
Près	30	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	40	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
	50	-0,2	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0
	60	-0,2	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0
	70	-0,2	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0
	80	-0,2	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0
Travers	90	-0,2	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0
	100	-0,2	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0
	110	-0,2	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0
	120	-0,2	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0
	130	-0,2	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0
	140	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Portant	150	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	160	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	170	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	180	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

(c) $\frac{\partial \beta_T}{\partial V_{app}}$ en $^\circ$ /nds

β_t/V_t	5	10	15	20	25	30	
Près	30	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	40	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	50	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0
	60	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0
	70	0,7	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9
	80	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9
Travers	90	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,8
	100	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8
	110	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7
	120	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,6
	130	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6
	140	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,5
Portant	150	0,6	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5
	160	0,9	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9
	170	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	180	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

(d) $\frac{\partial V_T}{\partial V_{app}}$ en nds/nds

β_t/V_t	5	10	15	20	25	30	
Près	30	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	40	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
	50	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
	60	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
	70	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
	80	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
Travers	90	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
	100	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
	110	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
	120	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
	130	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
	140	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Portant	150	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	160	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	170	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	180	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

(e) $\frac{\partial \beta_T}{\partial V_{Bs}}$ en $^\circ$ /nds

β_t/V_t	5	10	15	20	25	30	
Près	30	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9
	40	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8
	50	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6
	60	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5
	70	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3
	80	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2
Travers	90	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	100	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	110	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	120	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	130	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	140	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Portant	150	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
	160	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
	170	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	180	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

(f) $\frac{\partial V_T}{\partial V_{Bs}}$ en nds/nds

TABLE 1.1 – Propagation des erreurs sur un 60” Imoca en fonction de l’allure (β_T) et de la force du vent réel ($V_{T_{Surf}}$).

1.2.4.2 Dérivation des fonctions composées

La dérivée d’une fonction composée de deux fonctions dérivables est calculable comme le produit de leur taux de variation :

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{\partial y}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial x} \tag{1.26}$$

Nous pouvons voir d'après l'équation (A.18), que la détermination de β_{app} à partir de β_{eff} est fonction de la gîte. De ce fait, la propagation des erreurs de gîte sur la détermination du vent réel peut être estimée de la sorte :

$$\frac{\partial \beta_T}{\partial \phi} = \frac{\partial \beta_T}{\partial \beta_{app}} \frac{\partial \beta_{app}}{\partial \phi} \quad (1.27)$$

D'après (1.29) et (1.20), ne pas prendre en compte la gîte au près dans le cas de l'application numérique d'un $60''$, reviendrait à faire une erreur de $2,5^\circ$ sur β_{app} , dont l'influence sur β_T est de $1,5^\circ/^\circ$ pour ces données d'entrée (allure VMG près dans $15nds$ de $V_{T_{surf}}$). Soit une erreur propagée sur β_T de $2,5 \times 1,5 = 3,75^\circ$. Ainsi, lorsque le bateau va changer de bord en virant, la direction du vent réel indiquée va bouger de $2 \times 3,75 = 7,5^\circ$, alors qu'en réalité ce n'est pas le cas. Le degré de précision demandé par les utilisateurs est alors loin d'être respecté.

Nous venons de voir que la propagation des erreurs nécessite de porter attention aux données d'entrée. Intéressons-nous maintenant aux perturbations susceptibles de venir bruite ces données d'entrée.

1.3 La perturbation de la mesure

La théorie venant d'être exposée dans la section précédente, il faut maintenant se pencher sur les aspects pratiques et notamment sur les phénomènes perturbant les mesures et les concepts posés.

1.3.1 Les mouvements du bateau

Comme nous avons vu que le courant implique un changement de référentiel, le bateau gîte et tangue autour de son centre instantané de rotation (CIR). Il faut donc non seulement faire un changement de repère pour prendre en compte la position statique ou instantanée du bateau, mais aussi tenir compte de son comportement dynamique qui crée une vitesse relative par rapport au repère surface.

1.3.1.1 La réponse statique

Gîte seule : Partant du postulat que le vent réel $\vec{V}_{T_{Ground}}$ se déplace dans un plan purement horizontal, que le vent apparent \vec{V}_{app} aussi, alors l'angle d'incidence du vent apparent dans le profil des voiles β_{eff} est influencé par l'attitude du bateau, définie par l'angle de tangage θ et l'angle de gîte ϕ .

Nous pouvons extraire l'erreur induite sur l'angle de vent apparent en fonction de la gîte à partir de la formule (A.19) puis en la dérivant suivant ϕ :

$$\frac{\partial \beta_{eff}}{\partial \phi} = -\frac{\tan(\beta_{app}) \sin(\phi)}{\cos(\phi)^2 \tan(\beta_{app})^2 + 1} \quad (1.28)$$

Sur la Figure (1.9), est représentée l'évolution de l'écart entre β_{eff} et β_{app} en fonction de β_{app} et de la gîte. Il faut comprendre que plus le bateau gîte, plus l'angle de vent effectif se referme. Que la gîte n'a pas d'effets bout ou travers au vent apparent, et que l'écart ou l'erreur est importante pour les angles de vent apparent correspondant au *VMG* près et portant (environ 30° et 45° de β_{app}), soit aux allures les plus sollicitées.

De même, l'erreur sur l'angle de vent apparent en fonction de la gîte (cf. section 1.2.4.2), peut s'écrire :

$$\frac{\partial \beta_{app}}{\partial \phi} = -\frac{\tan(\beta_{eff}) \sin(\phi)}{\cos(\phi)^2 \tan(\beta_{eff})^2 + 1} \quad (1.29)$$

En pratique un bateau tangue aussi, du fait des vagues et également de la distribution des poids à bord. La quête du mât (inclinaison longitudinale) peut être également assimilée

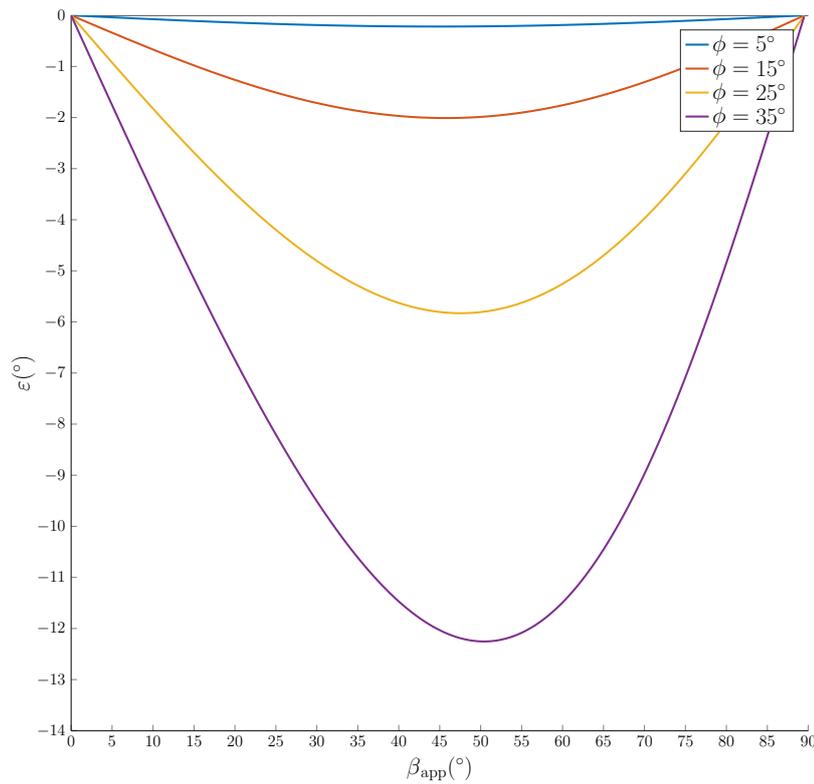


FIGURE 1.9 – Écart ε entre β_{app} et β_{eff} en fonction d'une gîte seule.

au tangage, dans le sens où elle incline également le capteur.

Gîte et tangage : La démonstration en annexe (A.11) nous permet de voir que la relation entre le vent effectif vu par le capteur et le vent apparent dans sa définition horizontale, lorsque le bateau n'est pas à plat, n'est pas directe :

$$\beta_{app} = \arctan\left(\frac{\cos(\theta) (\tan(\beta_{eff}) - \tan(\theta) \sin(\phi))}{\cos(\phi)}\right) \quad (1.30)$$

1.3.1.2 La réponse dynamique

Nous verrons dans la section suivante 1.3.2, que l'aérien est généralement placé en tête de mât. De ce fait, le capteur subit tous les mouvements de la tête de mât provoqués par les changements d'assiette du bateau. Ces mouvements sont dûs aux rafales de vent, mais aussi et surtout aux vagues. Ces changements d'assiette, même faibles, sont amplifiés par la longueur du mât qui varie entre une à plusieurs dizaines de mètres.

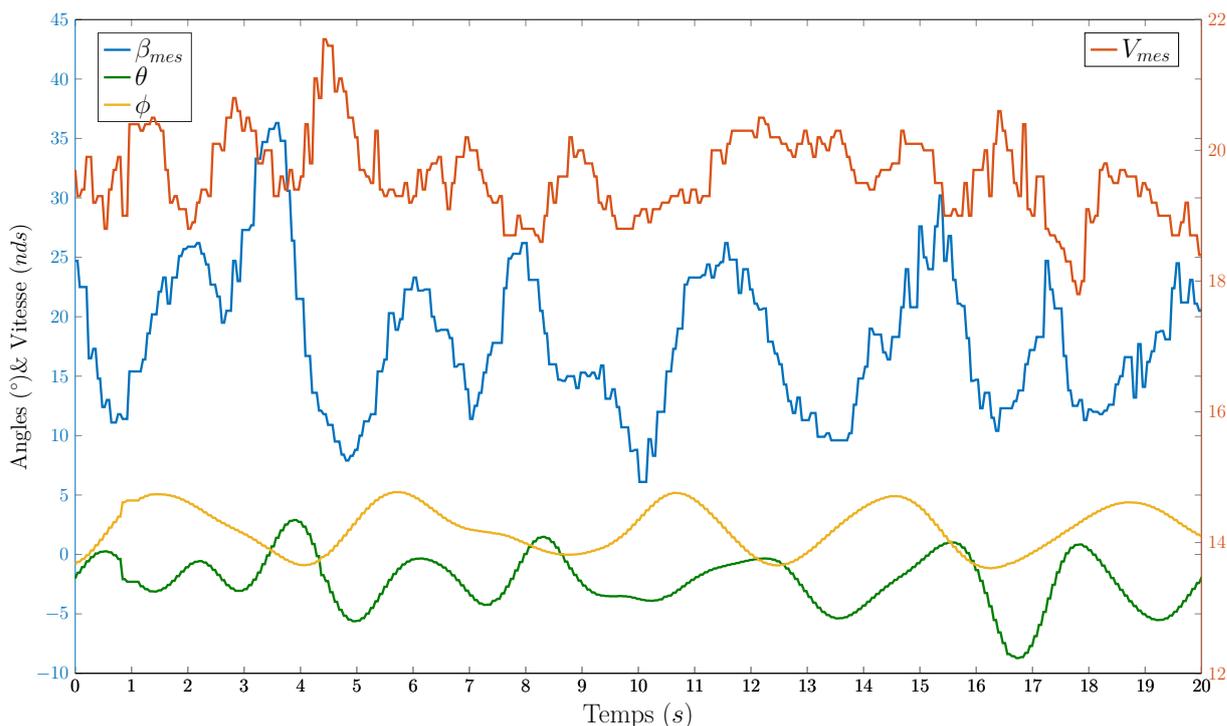


FIGURE 1.10 – Évolution des mesures faites par l'aérien en fonction de l'assiette du bateau. Mesures effectuées sur un 60" au près, dans des conditions de mer normales. Avec θ l'angle de tangage et ϕ l'angle de gîte.

La Figure (1.10) correspond aux mesures faites sur un 60" au près dans des conditions de mer normales. On remarque que sur cette période d'analyse courte (20 secondes), étant donné que le bateau n'a pas modifié sa trajectoire et que le vent réel observé est resté stable, les mesures de l'aérien devraient l'être aussi. Or, l'angle de vent apparent mesuré β_{mes} , oscille sur une plage de 30° avec un écart type de 6° . Cette très forte variation dans la mesure s'explique par les mouvements de la tête de mât \vec{V}_{dyn} , qui viennent perturber la mesure. On retrouve dans l'évolution des ces courbes une forte similitude.

L'observation de la corrélation entre β_{mes} et ϕ , montre un coefficient de 0,47, ce qui traduit un fort couplage entre les deux signaux. En analysant la corrélation dans le domaine fréquentiel, Figure (1.11), on trouve une cohérence supérieure à 0,75 sur la plage de fréquence $[0, 4; 0, 9]Hz$ avec un plateau supérieur à 0,95. Cette plage de forte corrélation correspond à la fréquence à

laquelle le bateau subit les vagues. Elle est fonction de la période des vagues et de la vitesse relative du bateau par rapport à celles-ci. C'est ce que l'on appelle la fréquence réduite ω_e dont le concept sera détaillé dans le chapitre 3. Ceci nous indique que les oscillations dans la mesure sont principalement dues aux vagues. Le déphasage est lui de -47° , ce qui correspond à un retard de $0,25\text{sec}$, et est imputable au retard mécanique du gréement et du capteur.

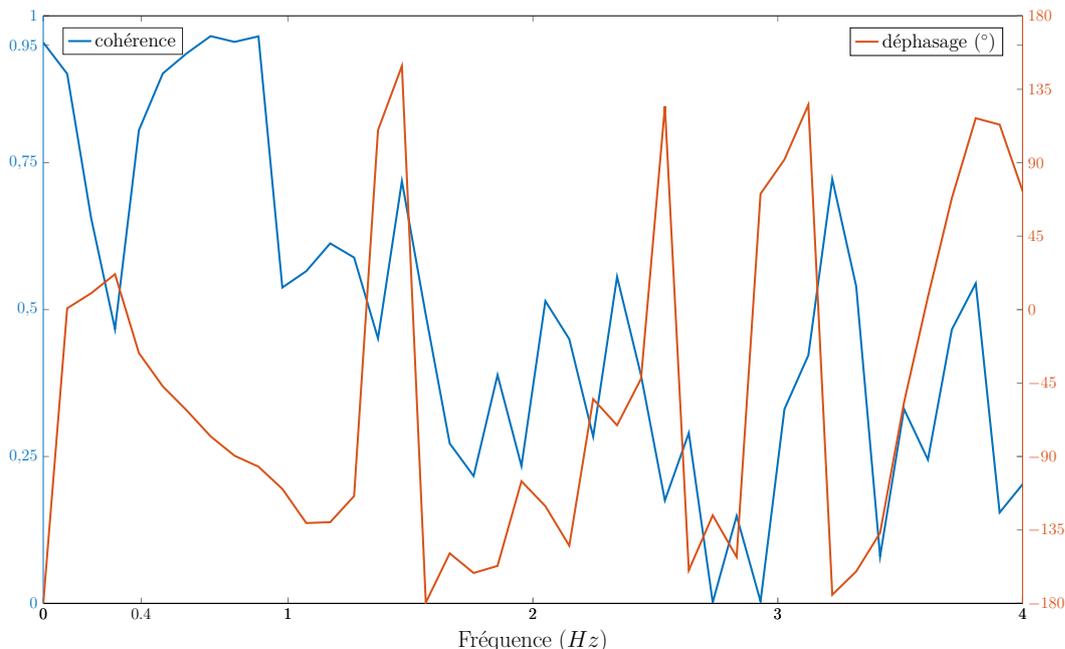


FIGURE 1.11 – Corrélation dans le domaine fréquentiel entre β_{mess} et ϕ des signaux de la Figure (1.10).

Cette oscillation dans la mesure due aux vagues est donc source d'erreurs. La procédure qui consiste à éliminer cette composante est couramment appelée débruitage et sera expliquée par la suite.

1.3.2 Emplacement de l'aérien

Le capteur de vent doit trouver sa place sur le voilier. Il faut qu'il soit placé à un endroit où il aura la lecture la plus directe possible du vent afin de limiter les perturbations. Il ne doit être masqué, ni par la structure du bateau (coque, gréement, roof...), ni par les voiles. Les emplacements à hauteur du pont sont donc exclus, ils sont aussi trop exposés aux vagues. Placer le capteur à l'avant du bateau pourrait être une bonne solution au près, mais le vent ne vient pas toujours de l'avant et le capteur serait masqué par les voiles au portant. La solution retenue dans presque toutes les configurations est de le fixer en tête de mât, au point le plus haut du bateau. De cette manière, le capteur est dégagé quelle que soit la direction du vent, et il est éloigné des vagues.



FIGURE 1.12 – Sur les AC50, bateaux de la Coupe de l’America qui vont plus vite que le vent réel au portant, un aérien a été rajouté à l’avant au niveau du pont. Le capteur n’est pas masqué puisque le vent apparent vient toujours de devant sur ce type de bateaux.

Si aujourd’hui le meilleur emplacement pour un aérien reste la tête de mât, nous allons voir que ce choix apporte son lot de contraintes qu’il va falloir prendre en compte, comme par exemple les mouvements du bateau, amplifiés par la longueur du bras de levier, la déflexion du vent par les voiles, le vrillage du mât ou encore la hauteur du point de mesure.

La problématique de la déflexion par les voiles est illustrée par la Figure (1.13a) qui est une photo du tourbillon marginal du bout de l’aile d’un avion. Ce tourbillon marginal s’explique par la différence de pression entre l’intradors et l’extradors, qui induit un enroulement tourbillonnaire à l’extrémité de l’aile. Le même phénomène s’applique aux voiles d’un bateau, que ce soit à l’extrémité basse au niveau de la bôme, ou bien en tête de mât. Ce tourbillon crée une déflexion du vent apparent, en amont du profil. Cette déflexion est appelée upwash dont l’amplitude est fonction de la portance de l’aile : $\gamma = f(F_{p_{Aero}})$.

Plus le capteur est proche de la tête de mât, plus il est dans la zone d’influence de l’upwash, voir la Figure (1.13b). C’est pourquoi les capteurs sont montés sur des perches afin de les extraire au maximum de cette zone de perturbation. La zone d’influence de l’upwash varie en fonction des bateaux, de leur configuration et de la force du vent. Les études numériques mettent en évidence dans certaines conditions un upwash encore supérieur à 1° à une distance de 3m au dessus de la voile.

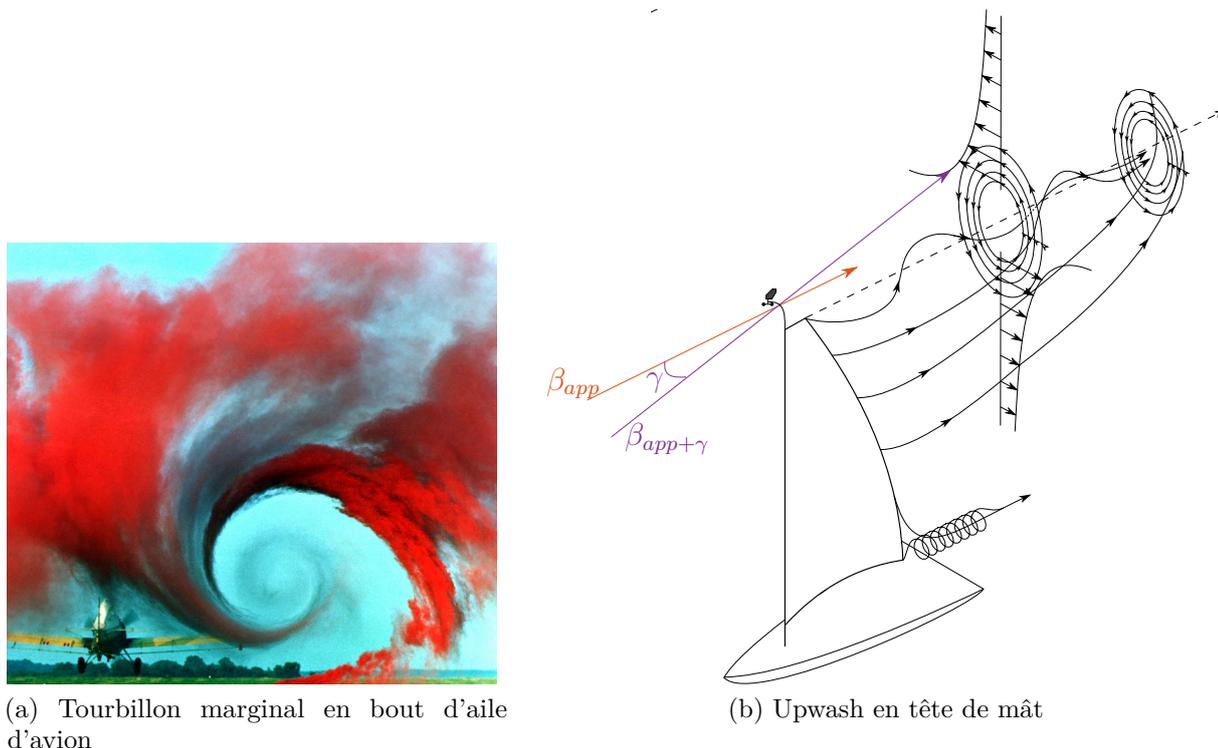


FIGURE 1.13 – Illustration de la turbulence en tête de mât. Le vent apparent β_{app} est perturbé en amont des voiles à cause du tourbillon marginal qui se forme au niveau de la chute. L’amplitude de cette déviation au niveau du capteur est appelée angle d’upwash γ . Comme la voile se termine par la bôme à son extrémité basse, il existe aussi à cet endroit un second tourbillon marginal. *Crédit (a) : NASA Langley Research Center.*

Malgré ces perturbations, la tête de mât reste l’endroit le plus adéquat pour positionner l’aérien.

Nous venons de voir quelles sont les perturbations de la mesure causées par les mouvements et la structure de bateau. Intéressons-nous maintenant à celles qui sont dues à la structure même de l’atmosphère.

1.3.3 La couche basse de l’atmosphère

Contrairement à un avion qui se déplace à une altitude élevée dans l’atmosphère, le voilier navigue en bordure de l’atmosphère, à sa limite avec le sol. C’est ce que l’on appelle la couche limite, la zone d’interface entre un corps (le sol, la mer) et l’air. Nous allons voir que dans cet environnement, les variations des conditions atmosphériques varient fortement avec l’altitude, et qu’elles engendrent des phénomènes marqués au regard de la hauteur des voiliers.

1.3.3.1 Le profil vertical

La couche limite est la zone d'influence d'une paroi sur un fluide en mouvement. Elle est caractérisée par le nombre de Reynolds qui décrit le rapport des forces liées à la vitesse et aux forces de frottement. L'interaction de cette paroi avec un fluide en mouvement uniforme sans obstacle U_e implique une diminution de la vitesse de ce fluide. Plus la distance avec la paroi est faible, plus la vitesse s'en trouve réduite et termine avec une vitesse théoriquement nulle au contact de la paroi, cf. Figure (1.14)

Ce phénomène s'applique aussi bien pour le vent avec les voiles, pour l'eau avec la coque et les appendices, que pour l'air avec le sol. Dans le cas de l'atmosphère, cette variation de vitesse avec l'altitude s'appelle le gradient vertical.

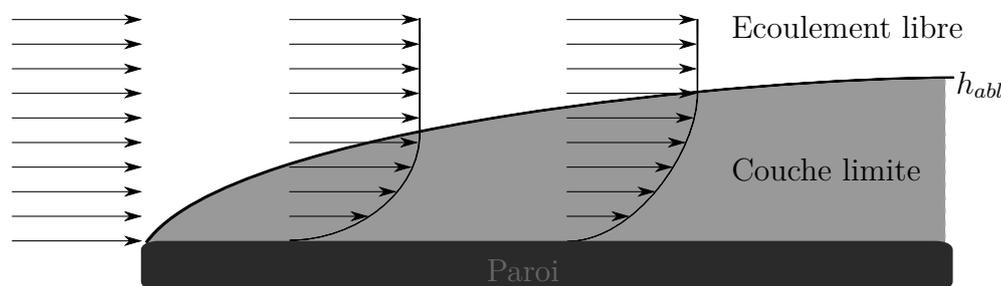


FIGURE 1.14 – Formation de la couche limite au contact d'une paroi.

La présence de ce gradient vertical, qui est fonction des conditions atmosphériques et de la nature du terrain, implique que la vitesse du vent réel n'est pas homogène sur la hauteur du bateau, cf. Figure (1.15). Le vent en tête de mât ne souffle pas à la même vitesse qu'au pont, ou bien qu'à la hauteur de référence z_{ref} des prévisions météorologiques, (en général 10m). Cela implique aussi que le vent mesuré à la hauteur $z_{capteur}$, n'est pas le même que celui à la hauteur z_{CV} , hauteur du centre de poussée vélique qui est généralement à 1/3 de la hauteur du mât.

Nous avons vu avec la section 1.2.2.3, que par le jeu de construction vectorielle, le vent apparent est fonction du vecteur vent réel \vec{V}_T . Alors, l'évolution de V_T en fonction de l'altitude va induire une modification du vecteur vent apparent \vec{V}_{app} , cf. Figure (1.16). Ce vrillage du vent apparent est fonction du vecteur de déplacement surface du bateau et donc de ses performances (polaire de vitesse), et ne sera pas identique selon l'amure.

Le gradient vertical est aussi accompagné d'un vrillage de la direction du vent réel, appelé "wind shear" [Garratt, 1992]. Bien que ces deux phénomènes soient toujours présents, ils varient en intensité et sont difficiles à appréhender, même pour des navigateurs expérimentés. Le gradient et le shear n'affectent pas la direction du vent réel (vent pour l'altitude du

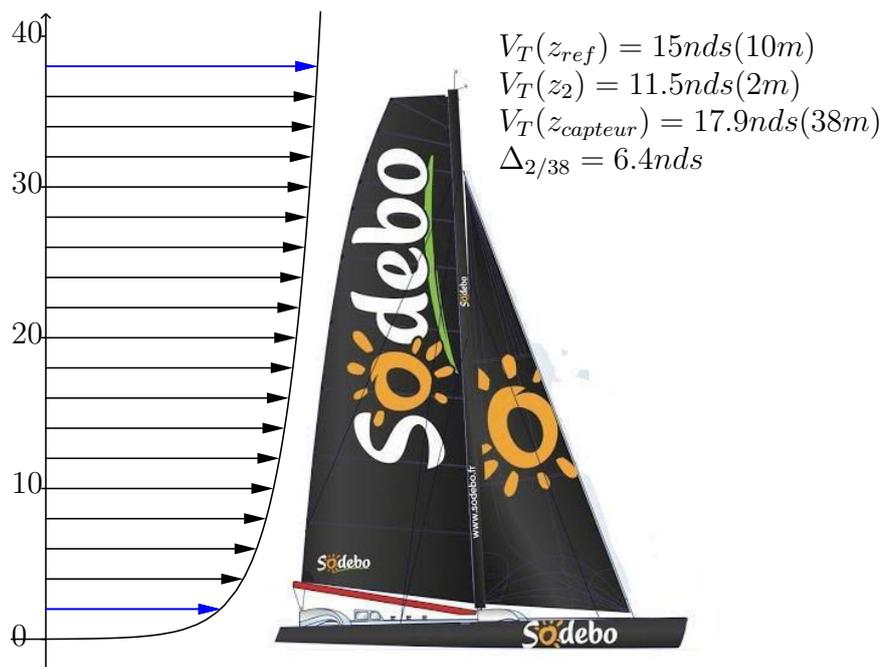


FIGURE 1.15 – Évolution de V_T en fonction de l'altitude z . Le gradient vertical produit une différence de vitesse $6.4nds$ sur la hauteur du plan de voile, soit 36% de $V_T(z_{capteur})$.

capteur), mais rendent la comparaison des performances d'une amure à l'autre impossible. La polaire de vitesse (Figure (1.20)) n'est plus symétrique. Une démonstration extrême est visible sur la Figure (1.17), où le shear est supérieur à l'angle de remontée au vent du bateau. Les voiles sont remplies dans la partie basse et permettent au bateau d'avancer, alors que la tête de mât subit un vent beaucoup plus à droite. Il faut faire la distinction entre le cisaillement et la spirale d'Ekman qui opère au-dessus de la couche de surface. L'erreur est d'appliquer les équations d'Ekman [Bowditch, 2002], alors qu'elles ne sont pas applicables : [Wyngaard, 1992], [Peña et Gryning, 2008], [Cenedese *et al.*, 1997]. Il faudra alors trouver une autre solution pour estimer le cisaillement vertical.

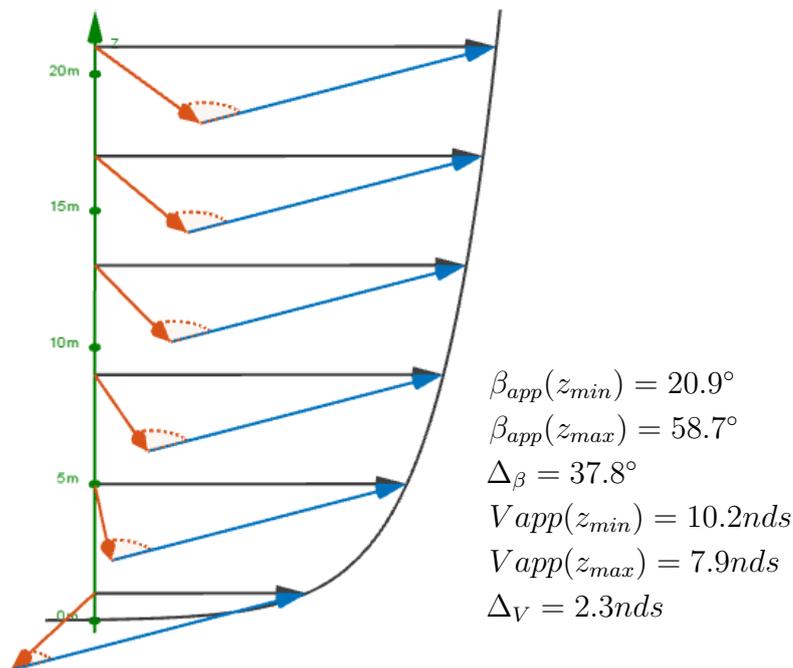


FIGURE 1.16 – Vrillage du vent apparent causé par le gradient vertical de V_T . Pour $\beta_T = 150^\circ$. La combinaison vectorielle du vent vitesse \vec{V}_{Surf} en bleu, avec le vent réel \vec{V}_T en noir qui varie en force suivant l'altitude, provoque un vrillage du vent apparent en rouge. En direction, mais aussi en force. Il est intéressant de noter que bien que V_T soit plus fort en altitude, le vent V_{app} perçu au niveau du pont est plus fort que celui perçu en tête de mât. Cette situation n'est présente qu'au portant quand l'inéquation $V_T(z_{top}) + V_T(z_{down}) < -2V_{Bs}\cos\beta_T$ est respectée.

1.3.3.2 Le poids de l'air

Nous avons vu avec l'équation (1.2) que la force générée par la vitesse du vent est fonction de la densité de l'air ρ . Cette densité est elle-même fonction de la température, du taux d'humidité relative ainsi que de la pression atmosphérique :

$$\rho = f(T, \varphi, P) \quad (1.31)$$

Ces variables n'étant pas constantes, elles influent sur le rendement aérodynamique de la voile. Pour des conditions atmosphériques différentes, à vitesse de vent équivalente, la force transmise aux voiles n'est pas identique.

Le Tableau (1.2) montre l'évolution de ρ en fonction de la température, qui varie de 10% entre 0 et 25°. Cela influe directement sur la force transmise aux voiles. Nous verrons comment normaliser la vitesse du vent réel pour faire abstraction de ce phénomène dans la section 3.3.2, en prenant en compte la pression atmosphérique et le taux d'humidité.



FIGURE 1.17 – Exemple de gradient et shear très prononcés. Les instruments de ce bateau bien calibré, indiquent qu’il remonte droit dans l’axe du vent réel (Le cadran du milieu affiche $\beta_T = 0$ et le cap du bateau et la direction du vent réel affichés sur les deux cadrans du bas sont identiques. Le bas des voiles est rempli de vent, tandis qu’en altitude, la combinaison du shear et du gradient amène le vent apparent et réel dans l’axe. *Crédit : Ockam^{MD}.*

$^{\circ}\text{C}$	ρ	$\Delta\%$
-5	1,317	+7,5
0	1,292	+5,5
5	1,269	+3,6
10	1,247	+1,8
15	1,225	0
20	1,204	-1,7
25	1,184	-3,5
30	1,165	-5,1

TABLE 1.2 – Masse volumique de l’air sec en fonction de la température pour $P_s = 1013,25\text{hPa}$.

1.3.4 La mesure depuis l’extérieur

L’une des solutions pour se dispenser des problèmes de la mesure du vent depuis le bateau, serait d’effectuer la mesure depuis un autre endroit. Comme par exemple un bateau à moteur, un réseau de bouées ou des points de mesure à terre. Si ces solutions ne sont pas

envisageables lors des courses au large, ce type de solution peut être appliqué lorsque la navigation s'effectue dans un emplacement délimité. Nous verrons dans le chapitre suivant qu'avec des Lidar, il est possible de scanner la zone de course et de fournir une cartographie en temps réel.

La mesure du vent par un réseau de capteurs est aussi une solution, comme par exemple lors de la 32^{ème} édition de l'America's Cup, avec le déploiement d'ULMs. Il est ensuite possible de créer une carte détaillée du vent à l'aide d'outils d'interpolation par CFD (Computational Fluid Dynamics). Les données d'entrées peuvent être des mesures physiques et/ou les prévisions météo ainsi que la topographie du terrain qui sert lors de la propagation de l'interpolation.

Depuis, il est strictement interdit par le règlement de l'épreuve de mesurer le vent, si cette mesure n'est pas effectuée depuis le bateau. Les solutions citées ne sont alors plus applicables.

Depuis la 34^{ème} Coupe de l'America, tous les bateaux, toutes les bouées, ainsi que les bateaux de l'organisation, sont instrumentés afin de fournir des données de réalité augmentée pour la télévision. Chaque bouée est équipée d'un GPS et d'un anémomètre. Toutes ces données sont envoyées sur le serveur de l'organisation en temps réel. Elles sont utilisées pour la télévision mais aussi par l'organisation pour organiser et arbitrer les courses.

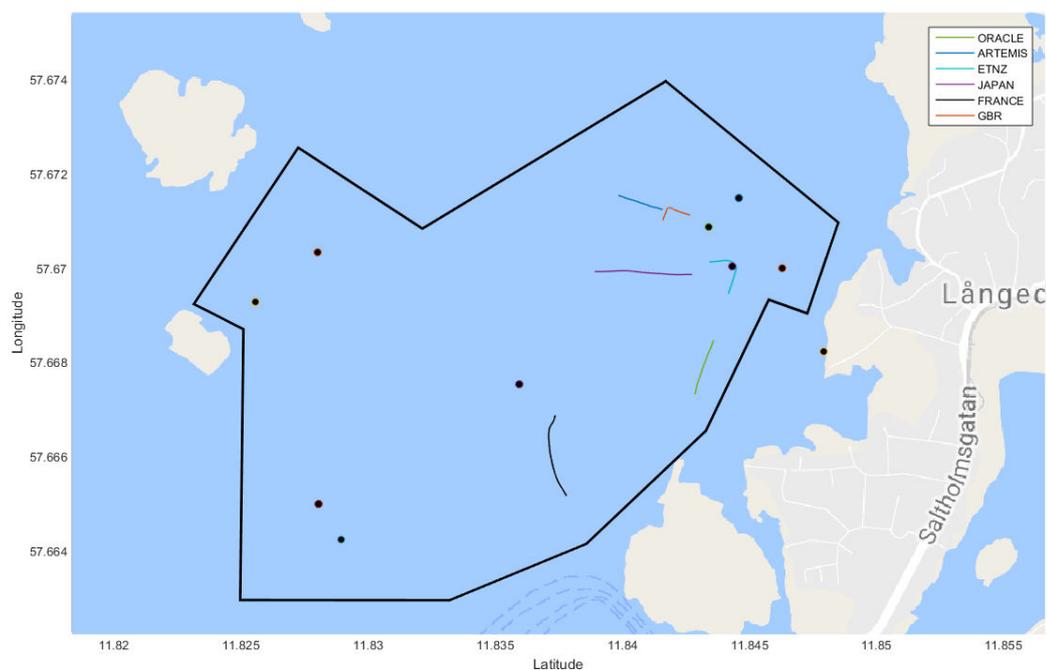


FIGURE 1.18 – Reconstitution virtuelle d'une manche des AC World Series de Gothenburg le 28 aout 2015.

Ce flux et son protocole [Milnes, 2016] sont mis à disposition des équipes. Il est alors possible d’afficher les informations sous diverses formes, comme par exemple la Figure (1.18) qui est une représentation temps réel de la course, mais aussi et surtout pour faire des statistiques en direct, qui seront utilisées à la fin de la manche afin d’ajuster les réglages pour la suivante.

Une autre utilisation possible de ce flux est d’en extraire les informations de vent, chaque bouée remontant ses données. La Figure (1.19) affiche la cartographie du vent reconstituée à partir des données envoyées par l’organisation. Cependant, en observant plus en détail la qualité des informations transmises et au regard du doute émis sur la partialité de ces données (l’organisation de l’événement est supervisée par le defender), il a été décidé de ne pas prendre en compte cette source d’information jugée non fiable.

Il ne reste donc plus que les mesures effectuées à bord du bateau, d’où leur importance.

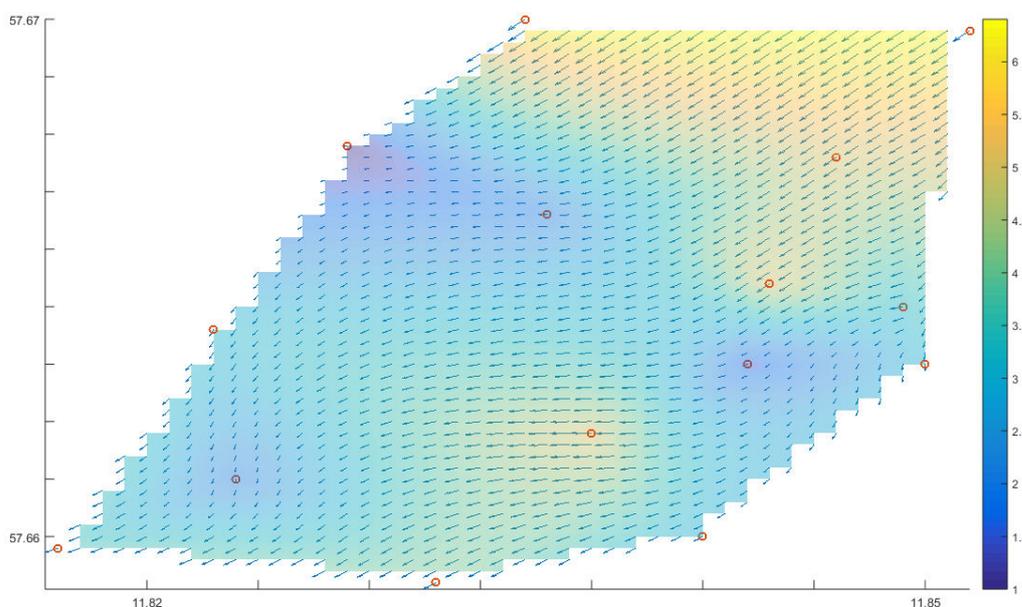


FIGURE 1.19 – Cartographie du champ de vent reconstitué à l’aide des informations transmises par les marques de parcours lors des AC World Series de Gothenburg le 28 août 2015.

1.4 Performance et outils au service de la performance

Si nous effectuons tous ces efforts pour améliorer la précision de la mesure du vent, c'est dans l'objectif de servir la performance du bateau. Intéressons-nous maintenant aux concepts utilisés en voile permettant de caractériser cette performance, puis aux outils nécessaires à l'utilisation de ces indicateurs.

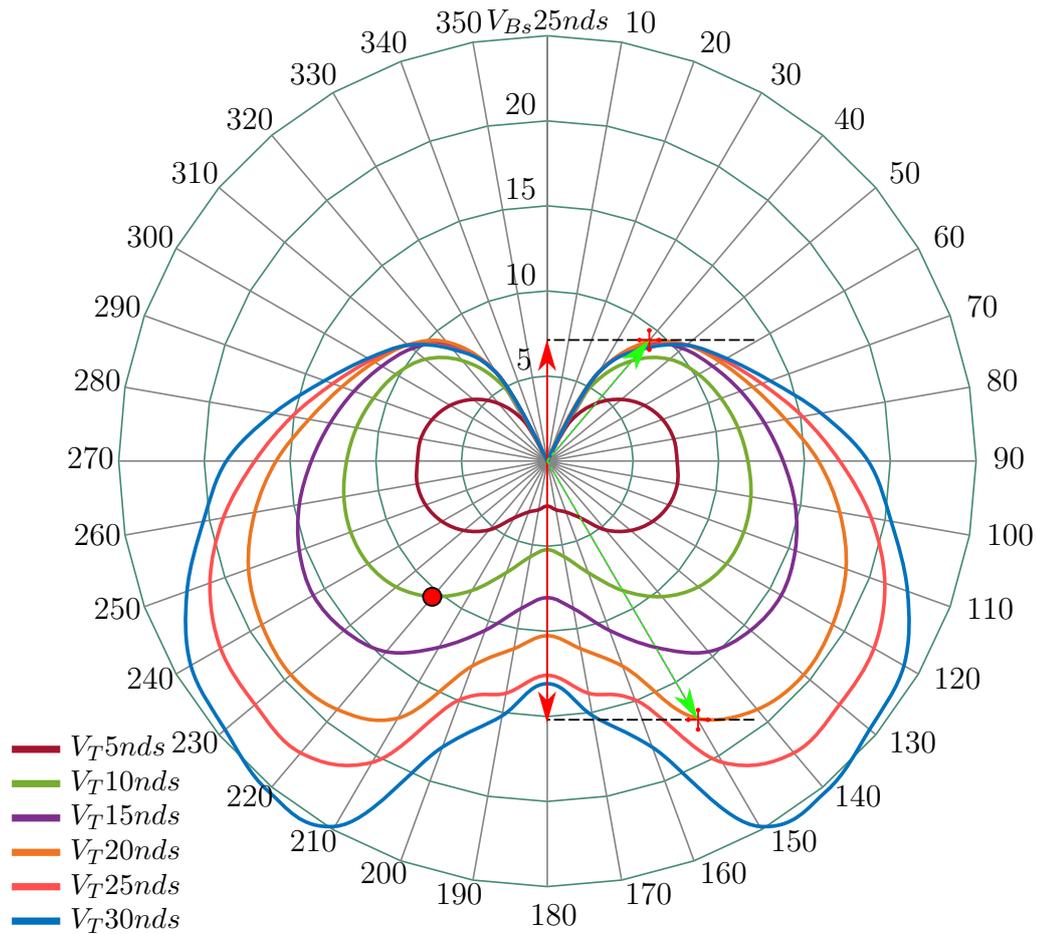


FIGURE 1.20 – Polaire de vitesse d'un 60'' Imoca. Les différentes courbes représentent les vitesses que le bateau est susceptible d'atteindre pour la force de vent correspondante en fonction de l'angle de vent réel. Le point marqué se lit de la façon suivante : lorsque le vent réel souffle à 10nds et que le bateau s'écarte de $360 - 220 = 140^\circ$ par rapport à la direction du vent réel, alors la performance attendue est une vitesse de déplacement de 10,4nds (Cellule rouge dans la Table (1.3)). La *VMG* se lit en regardant la projection sur l'axe vertical. Pour chercher l'angle cible, celui qui maximise la *VMG*, il suffit de graphiquement tangenter la courbe de vitesse pour la force de vent choisie (segments en pointillés). La vitesse cible $V_{BsTarget}$ et l'angle cible β_{Target} sont alors matérialisés par la flèche verte, et le *VMG* correspondant par la flèche rouge. Pour cet exemple au portant dans 20nds, $V_{BsTarget} = 17,44nds$, $\beta_{Target} = 150^\circ$ et $VMG = 15.1nds$ (Cellules rouges dans la Table (1.4)).

1.4.1 Polaire de vitesse & VMG

Les performances attendues en terme de vitesse de déplacement du bateau, sont représentées dans un graphique de polaire de vitesses qui caractérise la vitesse du bateau en fonction de :

- son allure : l'angle de vent réel $\beta_{T_{surf}}$,
- la force du vent réel $V_{T_{surf}}$.

Du fait que le bateau subisse le courant, le vent réel utilisé dans cette représentation doit être le vent réel surface et non pas le vent fond.

1.4.1.1 Comment lire une polaire de vitesse

La représentation sous forme de polaire permet de lire aisément les angles et vitesses cibles qui permettent d'obtenir le meilleur VMG , (Velocity Made Good) qui représente la composante de déplacement du bateau dans la direction du vent $\Theta_{T_{surf}}$. Au près, on cherche le compromis cap/vitesse qui permet de maximiser la VMG , et donc de maximiser la vitesse de remontée au vent.

La Figure (1.20) est construite à partir des données de la Table (1.3). Les rayons définissent les angles de vent réels $\beta_{T_{surf}}$, et les cercles concentriques les vitesses surface du bateau en nœud. Chaque courbe correspond à une vitesse de vent réel surface, $V_{T_{surf}}$.

Pour trouver la vitesse cible au près, il suffit de tracer une ligne perpendiculaire à la direction du vent réel, (0° , le haut de la figure), tangenter la courbe de vitesse surface correspondant à la force de vent souhaitée. C'est ce point d'intersection qui va nous donner le couple [angle de vent réel cible $\beta_{T_{target}}$; vitesse cible $V_{BsTarget}$] maximisant le VMG pour la $V_{T_{surf}}$ correspondante. Même principe pour le VMG au portant, mais en partant de l'angle 180° . Cette représentation est plus compréhensible que d'aller chercher les informations dans les tables (1.3) & (1.4)

β_T/V_T	5	10	15	20	25	30
30	2,71	5,01	6,04	6,06	6,06	6,06
40	4,42	7,71	8,99	9,14	8,69	8,58
50	5,63	9,31	10,29	10,62	10,62	10,59
60	6,54	10,19	11,15	11,64	11,88	12,07
70	7,15	10,79	12	12,76	13,32	13,83
80	7,5	11,3	12,86	14,11	15,12	16,21
90	7,57	11,7	13,76	15,81	17,06	18,71
100	7,71	12,05	14,68	17,32	19,18	20,36
110	7,55	12,2	15,39	18,54	20,94	22,36
120	7,09	12,06	15,75	19,22	22	24,01
130	6,34	11,5	15,47	19,52	22,25	24,54
140	5,28	10,4	14,62	19,05	22,37	25,32
150	3,83	8,78	12,64	17,44	20,44	24,78
160	3,18	6,96	10,57	12,82	14,92	17,89
170	2,91	5,71	8,8	11,2	13,85	15,19
180	2,64	5,2	8,03	10,25	12,59	13,08

TABLE 1.3 – Table de vitesses cibles $V_{B_{STarget}}$ correspondant à la Figure (1.20). Les cellules en vert correspondent au meilleur VMG près/portant.

β_T/V_T	5	10	15	20	25	30
30	2,35	4,34	5,23	5,25	5,25	5,25
40	3,39	5,91	6,89	7,00	6,66	6,57
50	3,62	5,98	6,61	6,83	6,83	6,81
60	3,27	5,10	5,58	5,82	5,94	6,04
70	2,45	3,69	4,10	4,36	4,56	4,73
80	1,30	1,96	2,23	2,45	2,63	2,81
90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
100	1,34	2,09	2,55	3,01	3,33	3,54
110	2,58	4,17	5,26	6,34	7,16	7,65
120	3,55	6,03	7,88	9,61	11,00	12,01
130	4,08	7,39	9,94	12,55	14,30	15,77
140	4,04	7,97	11,20	14,59	17,14	19,40
150	3,32	7,60	10,95	15,10	17,70	21,46
160	2,99	6,54	9,93	12,05	14,02	16,81
170	2,87	5,62	8,67	11,03	13,64	14,96
180	2,64	5,20	8,03	10,25	12,59	13,08

TABLE 1.4 – Table de VMG correspondant à la Figure (1.20). Les cellules en vert correspondent au meilleur VMG près/portant.

1.4.1.2 Le VMG à différentes allures

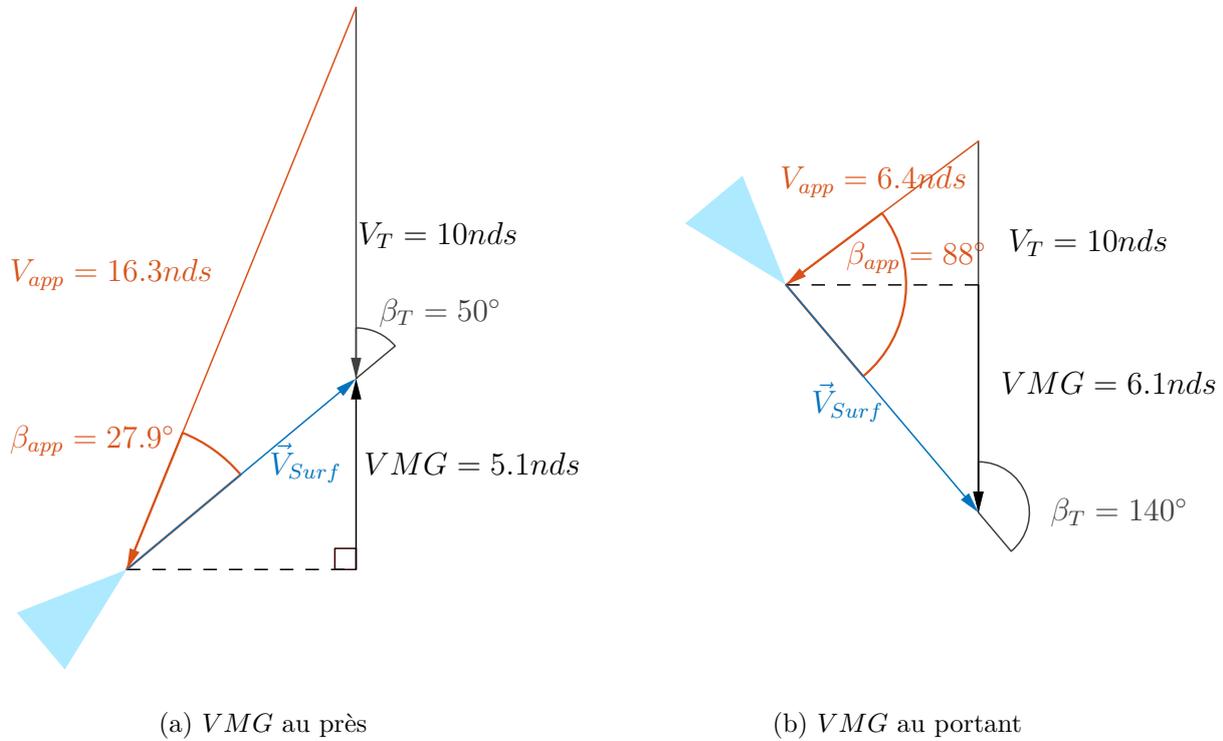


FIGURE 1.21 – Exemples de calcul du VMG en fonction de l'allure. Si pour cet exemple, avec et sans courant $\vec{V}_{T_{Surf}}$ reste identique, alors le VMG aussi. En pratique, la présence de courant modifie nécessairement $\vec{V}_{T_{Surf}}$, voir Figure (1.6).

La Figure (1.21) montre la projection vectorielle du VMG sur le triangle de vent réel. La Figure (1.22) montre l'effet de la dérive λ sur le VMG, et permet de visualiser l'erreur lorsqu'elle n'est pas prise en compte.

L'équation (1.32) donne le résultat de l'estimation du VMG sans prendre en compte la dérive, alors que l'équation (1.33) prend en compte les 6° de dérive dans le calcul. Dans cet exemple, l'erreur obtenue sur l'estimation du VMG est de 20%, ce qui est conséquent quand on cherche à quantifier la performance du bateau.

$$VMG = V_S \cos \beta_T = 8 \times \cos 50 = 5,1 \quad (1.32)$$

$$VMG_{dérive} = V_{Bs} \cos \beta_T = 8,04 \times \cos 56 = 4,5 \quad (1.33)$$

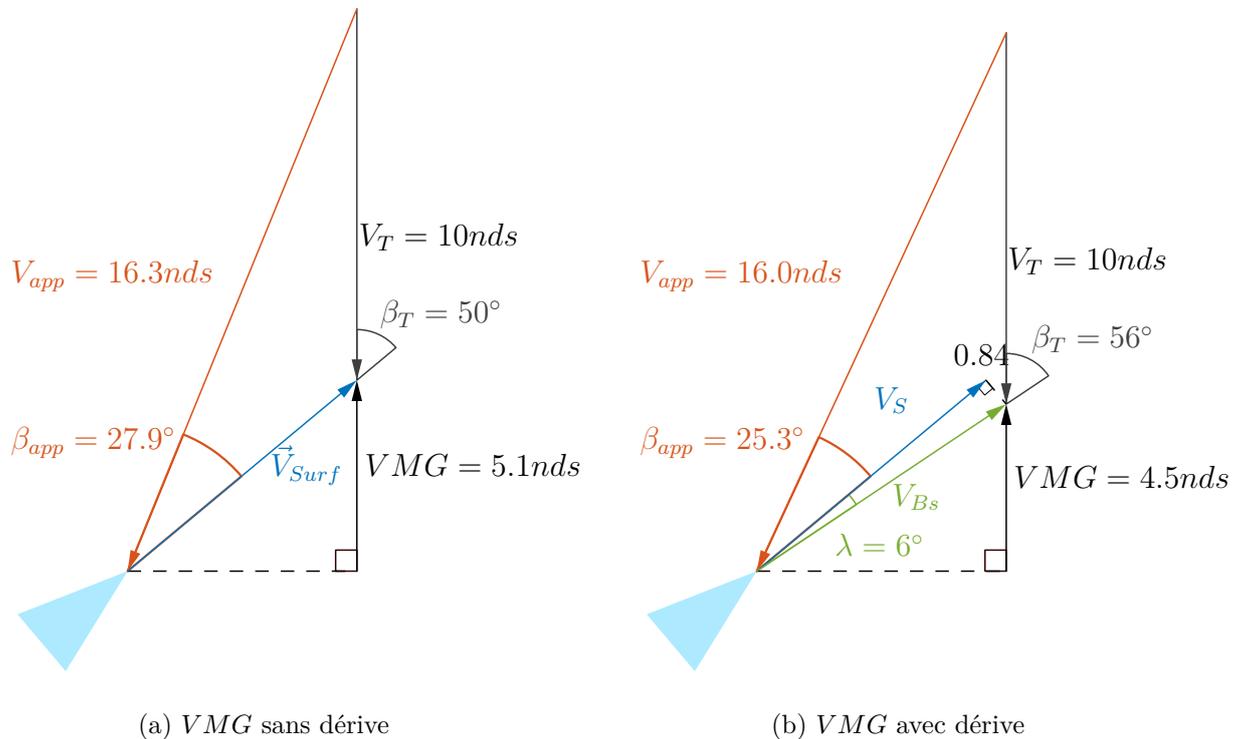


FIGURE 1.22 – Exemple de l’effet de la dérive sur le calcul du VMG.

1.4.1.3 VMC / GMG

L’objectif d’un voilier est rarement de se diriger directement dans la direction du vent, vent réel surface, mais de se rendre à un point fixe par rapport à la cartographie : un port, une bouée... Il est donc plus judicieux de maximiser la vitesse de rapprochement vers ce point, c’est ce que l’on appelle le *VMC* pour Velocity Made good on Course.

Dans le même esprit, si l’on veut maximiser notre remontée ou descente par rapport au vent réel dans le sens météorologique, alors il faut faire un calcul de *VMG* avec le vent fond $\vec{V}_{T_{Ground}}$. C’est ce que j’appelle le *GMG* pour Ground Made Good, cf. Figure (1.23). En présence de courant, le *VMG* et *CMG* ne sont pas identiques. Si avec et sans courant, pour l’exemple, $V_{T_{Surf}}$ reste identique, alors le *VMG* aussi, 4.6 contre 4.5 (le dixième s’explique par la légère augmentation du vent réel surface). Par contre, le *GMG* qui représente le gain par rapport au vent fond, est lui beaucoup plus faible, 2.5 contre 4.5 (la modification dépendant de l’orientation du courant relativement à la direction du vent réel). En pratique, la présence de courant modifie $\vec{V}_{T_{Surf}}$, voir Figure (1.6).

Nous allons maintenant voir quels sont les éléments qu’il faut embarquer sur le bateau pour calculer ces indices de performance.

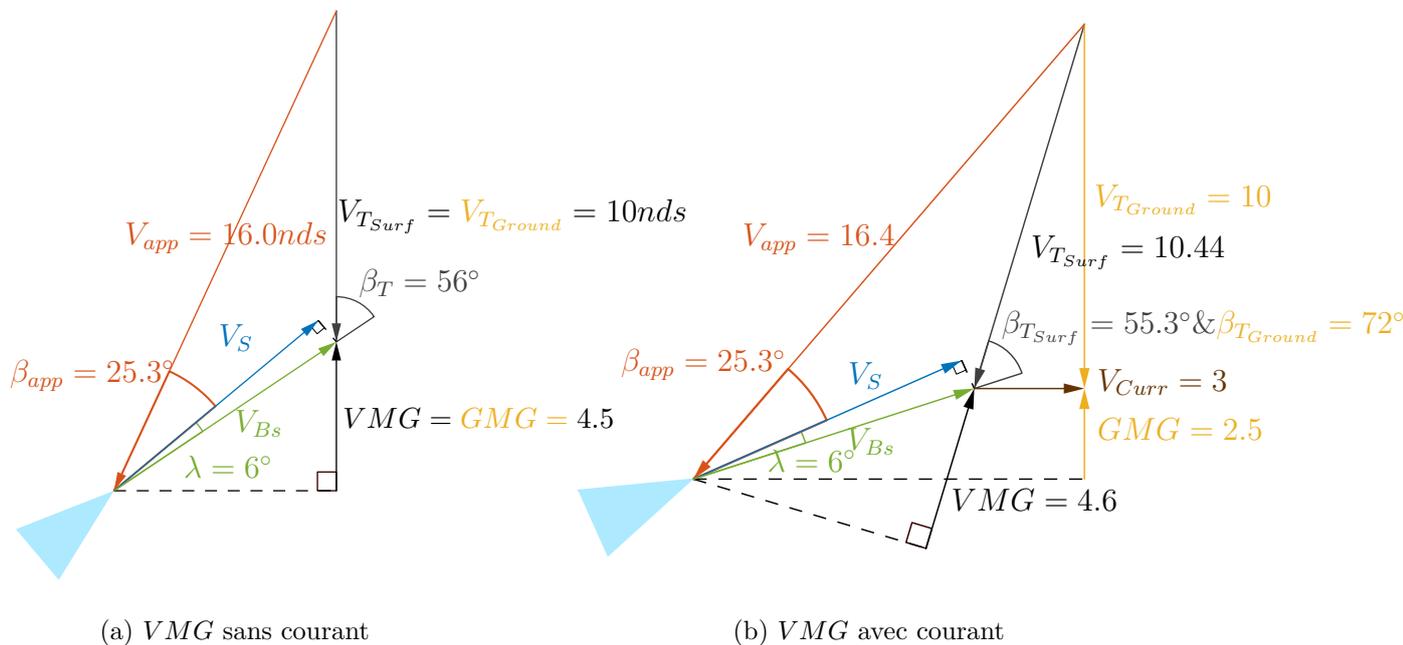


FIGURE 1.23 – Exemple de l’effet du courant sur le calcul du *VMG*. Le schéma avec l’ajout de 3nds de courant traversier a été construit de façon à conserver le même angle de vent apparent, comme le ferait un vrai barreur, et en émettant l’hypothèse que la vitesse surface soit restée identique. Le courant a pour effet de modifier significativement le vent surface en le faisant tourner de 16° et en augmentant légèrement sa force. Alors, comme le barreur a dû abattre pour conserver l’angle de vent apparent, la vitesse de rapprochement en vent fond (*GMG*) est fortement impactée, et est revue à la baisse pour cet exemple d’orientation du courant.

1.4.2 Centrales de navigation

L’électronique à bord des voiliers de compétition a commencé à faire son apparition à la fin des années 60 sur les 12M JI de la Coupe de l’Amérique. À cette époque, toute la chaîne d’acquisition et de calcul était analogique, cf. Figure (1.24). Puis, l’apparition des premiers ordinateurs s’est faite lors de la 24^{ème} édition en 1980. Une partie des calculs simples était alors effectuée à bord. Les données étaient enregistrées sur des bandes pour être analysées à terre par des ordinateurs plus puissants. L’essor de l’électronique à bord des voiliers apparaîtra véritablement au début des années 90 avec l’arrivée des microcontrôleurs.

Les centrales de navigation vont permettre de réaliser les différents calculs nécessaires à l’obtention des indices de performance. Les algorithmes déployés dans ces centrales ont besoin de données pour fonctionner. Ces données sont fournies par différents capteurs dont

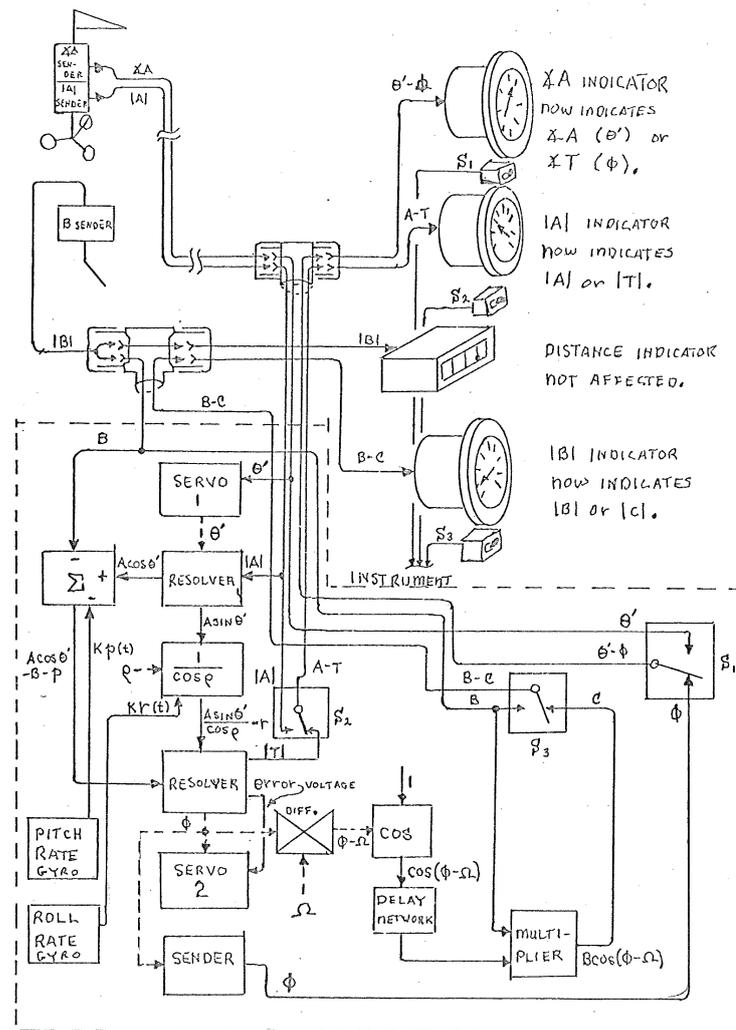


FIGURE 1.24 – Schéma électrique de la centrale analogique développée par McCurdy [McCurdy, 1970] en 1970.

les indispensables sont présentés dans le paragraphe suivant.

1.4.2.1 Les Capteurs

Pour afficher des informations utiles, il faut commencer par mesurer l'environnement. Aujourd'hui, un bateau de plaisance ou de régate amateur dispose à bord de moins de 10 capteurs. Leur nombre monte à une cinquantaine sur les IMOCA et Ultimes de la dernière génération, et à plusieurs centaines de voies de mesures sur les AC50 de la Coupe de l'America. Nous allons voir, dans cette section, quels sont ceux à minima indispensables pour résoudre le triangle de vent réel, et débruiter les mouvements du bateau.

1.4.2.1.1 Aériens L'aérien est le capteur qui mesure le vent effectif \vec{V}_{eff} . Il est placé en tête de mât, et déporté au moyen d'une perche plus ou moins longue. Ce capteur est l'objet du chapitre 2 dans lequel son fonctionnement et son utilisation dans la chaîne de mesure seront expliqués en détail.

1.4.2.1.2 Speedomètres Le speedomètre ou loch de vitesse est un capteur qui mesure la vitesse de déplacement longitudinale du bateau par rapport à la surface de l'eau, V_S . Son influence sur le calcul du vent réel est visible sur La Figure (1.1), et justifie l'attention qu'il faut porter à cette mesure et à la calibration du capteur. Il existe plusieurs technologies :



FIGURE 1.25 – Différentes technologies de capteurs speedomètre. (a),(b)et(c) de marque nke, (d) de marque ROWE^{MD}.

Roue à aube : c'est le capteur de base. Sa roue est entraînée par l'eau. La vitesse de rotation est mesurée à l'aide de l'aimant présent dans la roue. C'est un bon capteur pour la plaisance, car son coût de fabrication est faible. En revanche, il possède le désavantage d'avoir

une partie mobile immergée, donc sensible au développement de la flore marine. Le second désagrément est que sa roue se situe au niveau de la coque, donc dans la couche limite, qui est la partie proche de la coque, où le flux est ralenti (cf. Figure (1.14)). À cause de cet effet, ce capteur n'est donc pas linéaire sur sa plage d'utilisation. De plus, sur les Ultimes, la roue à aube se brise lorsqu'elle rentre en contact avec l'eau à plus de 30nds.

Électromagnétique : développé dans l'objectif de mesurer la vitesse sans partie mobile, il utilise l'effet Laplace. Lorsque la particule d'eau se déplace dans un champ magnétique (créé par le capteur), alors elle crée une tension perpendiculaire à son axe de déplacement et proportionnelle à sa vitesse. Cette tension est mesurée sur des ergots métalliques qui dépassent de la coque. Cette technologie est aujourd'hui abandonnée car elle a des problèmes de linéarité et demande une calibration usine précise. De plus, bien que ne disposant pas de partie mobile, les ergots métalliques sont quand même soumis à l'environnement marin.

Ultrasonique : linéaire et sans parties mobiles, il peut même être recouvert d'anti-fouling. Il mesure la vitesse à 8cm de la coque, donc en dehors de la couche limite, à l'aide de deux transducteurs. Ces transducteurs observent les particules en suspension dans l'eau, et mesurent le délai, entre le moment où elles sont vues sur le premier, puis le second transducteur.

Ce capteur possède tout de même quelques légers défauts, comme par exemple sa fréquence d'acquisition limitée. Ceux-ci sont expliqués et des solutions proposées dans [Kerhascoët *et al.*, 2016].

Doppler : c'est aussi un capteur ultrasonique, mais en général, cette catégorie de capteur dispose de plusieurs voies de mesure. Aussi appelé DVL, ils utilisent l'effet doppler pour mesurer la vitesse à plusieurs centimètres des transducteurs. Ils ont l'avantage non négligeable de pouvoir reconstituer un vecteur vitesse en deux dimensions, et donc de fournir l'information de déplacement surface V_{Bs} , et pas seulement la vitesse selon l'axe longitudinal, V_s .

En pratique, la mesure fournie par un speedomètre est rarement identique d'un bord sur l'autre. Ce phénomène est dû au fait que les passe-coques sont rarement implantés sur la ligne de foi, et que par les effets de gîte, l'écoulement n'est pas identique d'un bord sur l'autre. De plus, à cause de la forme non symétrique de la coque, selon un axe perpendiculaire à la ligne de foi, le bateau subit un désaxement de carène, voir Figure (1.26). Pour prendre en compte ce phénomène, il est conseillé de disposer non pas d'un mais de deux speedomètres, placés symétriquement à l'arrière du bateau. Il est donc recommandé de corriger la mesure du capteur par une table en fonction de la gîte, ou par une fonction spécifiée avec l'architecte.

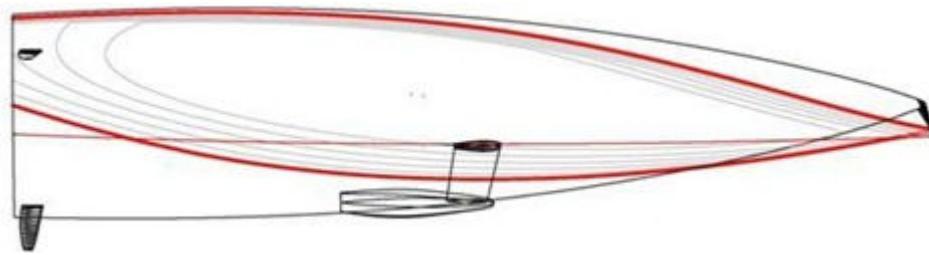


FIGURE 1.26 – Désaxement de la carène/surface mouillée, par rapport à la ligne de foi lorsque le bateau gîte.

1.4.2.1.3 Compas Il existe plusieurs technologies pour mesurer le cap du bateau, qu'il soit magnétique ou géographique.

Fluxgate : c'est le compas électronique le plus utilisé dans l'industrie marine à partir de la fin des années 80. Il mesure le champ magnétique terrestre. Comme il comporte un élément en suspension dans un liquide, il est soumis à un retard mécanique. Pour pallier ce retard mécanique, il est possible de l'associer à un gyroscope qui mesure la vitesse de lacet. Le dispositif devient ce qu'est appelé abusivement un gyro-compas. La composante basse fréquence du signal est fournie par le compas et les variations hautes fréquences par le gyroscope. Le cap fourni est dans le référentiel magnétique, il faut donc le corriger de la déclinaison magnétique locale. De plus, comme il est sensible à son environnement magnétique local, il faut effectuer une compensation pour corriger sa déviation.

AHRS : pour Attitude and Heading Reference System, c'est en général un dispositif à base de microsystèmes électromécaniques (MEMS), comportant 3 types de capteurs différents : gyroscopes, accéléromètres et magnétomètres. Chacun mesurant sur 3 axes, ce qui fait un total de 9 mesures. L'arrivée de cette technologie pour le grand public au début des années 2000 en fait maintenant le remplaçant du compas fluxgate. Il possède plusieurs avantages par rapport au fluxgate, comme le fait de ne pas comporter de macro pièce mobile, n'impliquant pas de retard mécanique. De plus, comme il dispose de plus de capteurs (accéléromètres), il est capable de fournir l'attitude en 3D du bateau, la gîte et le tangage en plus du cap magnétique. Cependant, comme il utilise aussi des magnétomètres, il est donc également sujet aux problèmes de déclinaison et de compensation magnétique, qui devra cette fois être effectuée en 3 dimensions.

Gyro-compas : à la manière des compas gyroscopiques comportant des vrais gyroscopes mécaniques, s'alignant avec le nord géographique, les nouvelles centrales inertielles sont tellement sensibles et précises qu'elles arrivent à mesurer la rotation de la terre et d'en déterminer la direction du nord géographique. Ce type de centrale utilise des technologies à

base d'enroulement de fibre optique et d'effet Sagnac.

Elles sont de plus en plus présentes sur les voiliers de compétition, mais elles ne sont pas choisies pour leur précision, qui n'est pas nécessaire pour leur application, mais parce qu'elles fournissent un cap dans le référentiel géographique. Cela veut dire qu'avec ce type de produit, on peut faire abstraction de tous les problèmes liés au magnétisme (déclinaison, calibration), et qu'il est possible de naviguer à des latitudes plus proches des pôles, là où l'inclinaison magnétique est très prononcée.

L'inconvénient majeur de ce type de capteur reste son prix, démarrant à 40K euros.

1.4.2.1.4 GPS Le récepteur GNSS, en général de type GPS, permet de déterminer la position de l'antenne sur le globe. Cette information est cruciale en navigation, lorsque que l'on cherche à reporter sa position sur une carte ou bien pour le fonctionnement de logiciel de cartographie électronique. Dans ce cas, c'est la précision de la position absolue qui est importante. Elle est de l'ordre de 3m pour un GPS classique et sub-métrique pour un bon GPS différentiel. Dans le cadre du calcul du triangle de vent réel, c'est le vecteur déplacement fond \vec{V}_{Ground} qui nous intéresse. Alors que la précision absolue importe peu, c'est la précision relative qui nous concerne, car c'est en dérivant deux positions successives qu'est obtenue l'information de vitesse.

Il faut savoir que les GPS différentiels reçoivent les corrections à appliquer par satellite géostationnaire, (technologie SBAS, EGNOS en Europe). Pour recevoir ces corrections, il faut donc être sous la couverture de ces satellites, mais surtout dans une zone où les corrections sont disponibles. En effet, les corrections sont calculées par un réseau de stations références qui en déduisent les corrections. Il faut donc être à proximité d'une station pour que ce service soit disponible. Ce qui n'est pas le cas lorsque l'on navigue loin des continents, lors d'une transatlantique ou bien lors d'un tour du monde, cf. Figure (1.27).

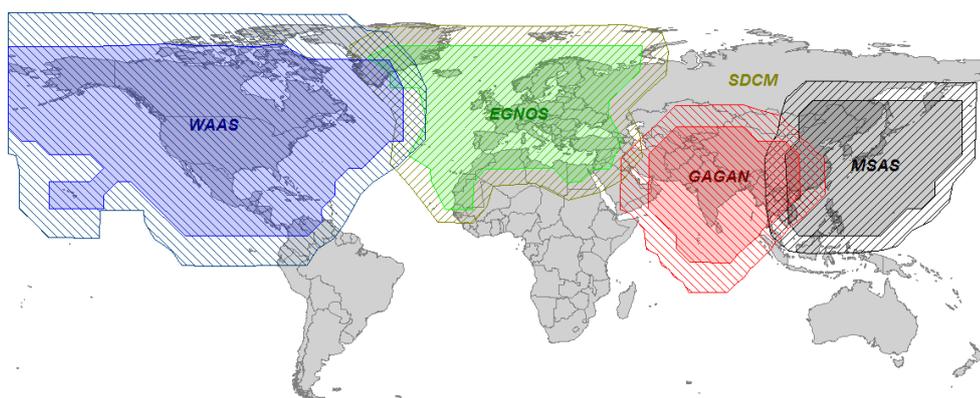


FIGURE 1.27 – Zone de couverture des systèmes SBAS. *Crédit : SXBluegps*

1.4.2.1.5 Autres types de données à mesurer

L'angle de mât : certains types de mâts sont capables de pivoter sur leur axe vertical pour améliorer le rendement aérodynamique. Ce type de mâts aile est très présent sur les monocoques IMOCA et sur les trimarans. Il faut donc mesurer cet angle de rotation β_{mat} . En plus d'une rotation suivant leur axe vertical, les mâts des trimarans basculent latéralement du côté au vent de la plateforme, suivant un angle ϕ_{mat} . Cela va augmenter le moment de redressement et optimiser l'orientation du plan de voilure. Enfin, certains mâts sont aussi capables de modifier leur quête, ce qui fait un angle θ_{mat} supplémentaire à mesurer suivant l'axe longitudinal de la plateforme.

Le vrillage du mât : le vrillage du mât $O_{\beta_{mat}}$ peut être mesuré à l'aide de 2 centrales inertielles, l'une en pied et l'autre en tête de mât. Cependant, l'expérience de nke dans ce domaine démontre que ce type de mesure n'est pas fiable avec des centrales de type MEMS. Il faut utiliser des centrales de très bonne qualité, hors de portée de la plupart des équipes (environ 2x40000 euros). Cette technique n'est donc utilisée que sur la Coupe de l'America. Une autre solution est d'équiper le mât de jauges de contraintes avec une ou plusieurs fibres optiques, interférométrique ou à réseaux de Bragg (environ 20000 euros). La solution la moins onéreuse (inférieure à 10000 euros) étant d'utiliser un système avec une ou plusieurs caméras placées en tête de mât, qui filment le pont du bateau où sont placés des repères visuels [Le Pelley et Modral, 2008]. Cette dernière solution est contraignante car elle apporte du poids et de l'encombrement à l'endroit le plus sensible du bateau. En pratique, il n'existe quasiment aucun bateau qui effectue ce type de mesures, excepté sur le circuit de la Coupe. On peut alors construire des tables de calibrations initialisées par les données fournies par les modèles éléments-finis du bureau d'étude qui a échantillonné le mât. Les entrées de ces tables peuvent être la force du vent, mais aussi la charge dans le gréement. Des torsions de $\pm 5^\circ$ entre la base et la tête du mât sont courantes.

Spécifiques aux foilers : Les foils sont apparus dans le monde de la course au large avec le bateau *Paul Ricard* d'Éric Tabarly en 1979 et se sont démocratisés avec la classe de trimarans 60' ORMA dans le milieu des années 90. Cette génération de foils peut être assimilée à des dérives courbes qui soulagent le poids du bateau en exerçant une force hydrodynamique verticale, mais sans faire décoller complètement le bateau. Le premier bateau à voile volant océanique est l'Hydroptère. En service de 1995 à 2015, il est capable de décoller en étant seulement en appui sur ses foils. Ce type de bateau est, depuis la coupe de l'America de 2013, le nouveau standard. Toutefois, il amène de nouvelles problématiques, notamment au niveau de l'estimation du vecteur de déplacement surface. Étant donné que les coques ne touchent plus l'eau, les speedomètres classiques ne sont plus utilisables. De plus, l'angle de

L'une des problématiques abordée dans les travaux de cette thèse concerne le débruitage du vent, réel et apparent. La qualité des techniques de débruitage est restée très subjective. Bien que le concept soit implémenté très tôt chez nos concurrents (on retrouve la fonctionnalité sur le schéma analogique de la Figure (1.24) datant de 1970), elle ne fût implantée dans la centrale haut de gamme nke qu'en 2007, lorsque nous avons commencé à utiliser des centrales inertielles. Depuis, plusieurs universitaires se sont penchés sur le problème, sans y apporter de nouveauté : [Rongere et Kobus, 2008], [Horel, 2011], [Gerster, 2016]. Notre contribution au débruitage du vent réel et apparent sera détaillée dans le chapitre 3.

1.4.2.3 Les afficheurs

L'installation électronique est toujours accompagnée d'afficheurs pour que les membres d'équipage puissent profiter des informations calculées par la centrale. Ils servent aussi à effectuer les réglages de calibration des capteurs et, lorsque le bateau dispose d'un pilote automatique, certains sont aussi utilisés pour le commander. Traditionnellement, les afficheurs sont à poste fixe et filaires, mais de plus en plus d'écrans sans fils sont adoptés à bord des bateaux, jusqu'à voir couramment des dispositifs de type montre connectée, et même des afficheurs à réalité augmentée, cf. [Morgère, 2015].

1.4.2.4 Les actionneurs

Nous avons vu en introduction que l'une des applications de ces travaux de thèse a pour objectif d'être utilisée sur des bateaux naviguant sous pilote automatique. Que ce soit pour de la compétition ou de la plaisance, le principe reste le même : l'intelligence décide, en fonction des paramètres d'entrée, de l'angle de barre $\alpha_{rTarget}$ qu'elle juge adéquat pour atteindre l'objectif que le skipper lui a donné. Cet objectif peut être de suivre un cap, de conserver un angle de vent réel β_T , etc.

Une autre boucle d'asservissement va s'assurer que l'angle de barre courant α_r soit toujours au plus proche de la consigne $\alpha_{rTarget}$, en gérant la puissance électrique envoyée à l'actionneur. Cette boucle de rétroaction utilise en général un actionneur mécanique de type vérin linéaire. Le plus souvent, ce sont des vérins hydrauliques. L'asservissement se fait en tension sur le moteur de la pompe hydraulique, mais de plus en plus de bons vérins électriques, ou de systèmes à crémaillères, sont disponibles sur le marché.

L'objectif de ce paragraphe n'est pas de détailler le fonctionnement de ce type de produits, mais de rappeler que les pilotes fonctionnent avec de l'énergie électrique. Ainsi, cette électricité doit être stockée et souvent produite lorsque le temps d'utilisation dépasse la journée. Cette gestion de l'énergie à bord est souvent complexe et nécessite du matériel lourd (batteries, carburant). C'est donc un critère de performance sur un voilier. Moins le pilote bougera la barre, moins il consommera et plus le système d'énergie embarqué pourra être réduit.

Un bon algorithme de pilotage enverra des consignes d'angle de barre $\alpha_{r_{Target}}$ le plus judicieusement possible, en évitant le plus possible les mouvements parasites. Les algorithmes de pilotages se basent sur les données fournies par les capteurs. En regardant la Figure (1.10), on se rend compte que la donnée d'entrée est très bruitée. D'où l'importance du débruitage des données d'entrée pour améliorer la performance du bateau. D'une part parce que le pilote barrera mieux, mais aussi parce que le poids du système d'énergie sera réduit.

1.5 Conclusion

Nous venons de voir dans ce premier chapitre le contexte spécifique à la mesure du vent depuis un voilier, en exposant le fonctionnement général d'un bateau à voile. Cela nous a permis de comprendre les différents concepts de vent, et de mettre en évidence les problématiques associées à la mesure et celles liées à la conceptualisation et reconstruction du vent réel en 3 dimensions.

Notre contribution à la résolution des problématiques attachées aux perturbations dues aux mouvements de plateforme, ainsi que la conceptualisation en 3 dimensions, sera expliquée dans le 3^{ème} chapitre de ce manuscrit.

La mise en évidence du fort couplage et de la propagation des erreurs entre les équations, interpelle sur la nécessité d'apporter le plus grand soin à la source de l'information. Notre contribution à l'amélioration de la mesure est détaillée dans le chapitre suivant. D'une part en travaillant sur le capteur de vent en lui-même, puis en spécifiant de nouvelles stratégies pour traiter son signal numérique.

Sommaire

2.1	Introduction	52
2.2	Les capteurs	52
2.2.1	Moyens de mesure de la vitesse	52
2.2.1.1	Par la force, la traînée & la pression	52
2.2.1.1.1	À plaque :	52
2.2.1.1.2	À boule :	53
2.2.1.1.3	À tube :	53
2.2.1.2	Anémomètre à coupelles	54
2.2.1.3	Anémomètre à ailettes	55
2.2.1.4	Fil-chaud	56
2.2.1.5	Ultrason	56
2.2.1.5.1	Temps de Vol :	56
2.2.1.5.2	Résonance acoustique :	57
2.2.1.5.3	Avantages :	58
2.2.1.5.4	SODAR :	59
2.2.1.6	LIDAR	60
2.2.1.7	RADAR	61
2.2.1.8	Conclusion	61
2.2.2	Moyens de mesure de la direction	61
2.2.2.1	Girouette	61
2.2.2.1.1	Numérisation	62
2.2.2.1.2	Offset d'alignement	62
2.2.2.2	Rotavecta	62
2.2.3	Technologie sélectionnée	63
2.3	L'anémomètre à coupelle	65
2.3.1	Caractéristiques de l'écoulement de l'air sur une coupelle	65
2.3.2	Coefficient de portance et de traînée	66

2.3.2.1	Pour un angle d'incidence de $\pm 90^\circ$	66
2.3.2.2	Pour un angle d'incidence variable	66
2.3.3	Rotor symétrique	68
2.3.3.1	Moment des forces exercées sur les coupelles de l'anémomètre	68
2.3.3.2	Facteur anémométrique	72
2.3.4	Rotor asymétrique	72
2.3.4.1	Étude du démarrage de l'anémomètre	72
2.3.4.1.1	Moment résultant dû aux 3 coupelles	72
2.3.4.1.2	Vitesse de vent nécessaire au démarrage de l'anémomètre	73
2.3.4.2	Modélisation de la dynamique	74
2.3.5	Réponse à la gîte	75
2.3.6	Constante de temps et de distance	75
2.3.7	Précision de la mesure	77
2.3.8	Overspeed	80
2.3.9	Masquage de la perche	81
2.3.10	Comportement en régime établi / Calibration	82
2.4	Modélisation de la girouette	84
2.4.1	Équations	85
2.4.1.1	Établissement de l'équation différentielle	86
2.4.1.2	Modélisation	88
2.4.1.2.1	Forme de la pale	88
2.4.1.2.2	Théorie des profils minces	88
2.4.1.2.3	Coefficient de portance	89
2.4.1.2.4	Calcul de la surface et du centre aérodynamique	90
2.4.1.2.5	Calcul du moment d'inertie	90
2.4.2	Validation Expérimentale	91
2.4.2.1	Pales étudiées	92
2.4.2.2	Essais réalisés	94
2.5	Optimisation de la forme de pale	97
2.5.1	Introduction	97
2.5.2	Données d'entrée	97
2.5.2.1	Équations à optimiser	98
2.5.2.2	Contraintes de design et performance	100
2.5.2.3	Distribution de la vitesse du vent réel	101
2.5.3	Résultats	104
2.5.4	Optimisation du contrepoids	107
2.5.4.1	Problématique	107

2.5.4.2	Mise en équation	108
2.5.4.3	Application numérique	109
2.5.4.4	Déséquilibre d'accélération	109
2.5.5	Conclusion	111
2.6	Traitement du signal prédictif	113
2.6.1	Introduction & théorie	113
2.6.1.1	Le filtre de Kalman	113
2.6.1.1.1	Hypothèses	114
2.6.1.1.2	Prédiction	114
2.6.1.1.3	Mise à jour	115
2.6.1.1.4	Initialisation	115
2.6.2	Application à la girouette	116
2.6.2.1	Méthodologie d'optimisation de la girouette	116
2.6.2.2	Mise en équations	117
2.6.2.3	Performance du filtre	120
2.6.2.4	Puissance de calcul	120
2.6.3	Application à l'anémomètre	122
2.6.3.1	Via l'équation du mouvement à 3 godets :	122
2.6.3.2	Via l'équivalence d'un 1 ^{er} ordre :	122
2.6.3.3	Via le point de vue de couple :	123
2.6.3.3.1	Théorie	124
2.6.3.3.2	Évaluation expérimentale de C_A & C_D	125
2.6.3.3.3	Implantation dans un filtre de Kalman	127
2.7	Conclusion	130

2.1 Introduction

Afin de pouvoir reconstruire le vent réel, il est nécessaire, entre autres, de mesurer le vent apparent. Ce chapitre va donc s'intéresser à cette mesure et à son amélioration. Il existe plusieurs technologies pour mesurer le vent apparent. Nous allons en faire la revue dans la section 2.2 et montrer qu'une technologie est plus utilisée et mieux adaptée que les autres. Puis, le comportement dynamique de ce capteur sera exposé dans la section 2.3 et un modèle mathématique développé, dans l'objectif de le réutiliser afin de sélectionner/spécifier, la forme optimale des senseurs. Cette étape d'optimisation de la forme des parties mobiles du capteur sera expliquée dans la section 2.5. Enfin, il s'agira dans la section 2.6, d'intégrer le modèle développé dans la partie traitement du signal, afin de fournir à la centrale de navigation non pas la position absolue du capteur mais l'information sur la perturbation qui est à l'origine de son comportement dynamique.

2.2 Les capteurs

Nous allons dans cette section parcourir les différentes technologies envisageables pour mesurer la vitesse et la direction du vent apparent.

2.2.1 Moyens de mesure de la vitesse

Les techniques de mesure de la vitesse du vent ont évolué, voici les principaux types d'anémomètres que l'on peut trouver aujourd'hui sur le marché.

2.2.1.1 Par la force, la traînée & la pression

Cette catégorie rassemble les anémomètres utilisant la force exercée par le vent sur le capteur pour en déduire sa vitesse.

2.2.1.1.1 À plaque : Le premier anémomètre aurait été inventé par Alberti en 1450. Il est constitué d'une plaque suspendue orientée perpendiculairement à la direction du vent. La force exercée par le vent incline plus ou moins cette plaque par rapport à la verticale. On peut alors en déterminer la vitesse du vent après avoir étalonné le dispositif. La Figure (2.1a) est une illustration de ce type d'anémomètre issue des plans de Hooke en 1664.

2.2.1.1.2 À boule : Inventé en 1900 par Daloz, il mesure aussi la force exercée par le vent sur le profil. Il est calibré à partir de la vitesse terminale de cette boule (vitesse limite atteinte en chute libre v_t) :

$$v_t = \sqrt{\frac{2mg}{\rho S C_t}} \quad (2.1)$$

Le coefficient de traînée, C_t , d'une sphère dépend du nombre de Reynolds mais est stable et égal à 0.44 pour la plage $[10^3 < Re < 5.10^5]$ lorsque l'écoulement est turbulent (cf [Hoerner, 1965]). On choisira donc un diamètre de sphère permettant de rester dans cette plage au regard de l'amplitude de vitesse que l'on souhaite mesurer (voir équation (1.1)). Si la sphère est fixée à un pendule et soumise à un vent apparent, alors la relation entre le vent mesuré, la vitesse terminale et l'angle du pendule avec la verticale α_P peut s'écrire :

$$V_{mes} = \sqrt{v_t^2 \tan \alpha_P} \quad (2.2)$$

L'un des intérêts de ce moyen de mesure de la vitesse est que le capteur ne doit pas nécessairement être orienté dans l'axe du flux, il s'oriente tout seul.

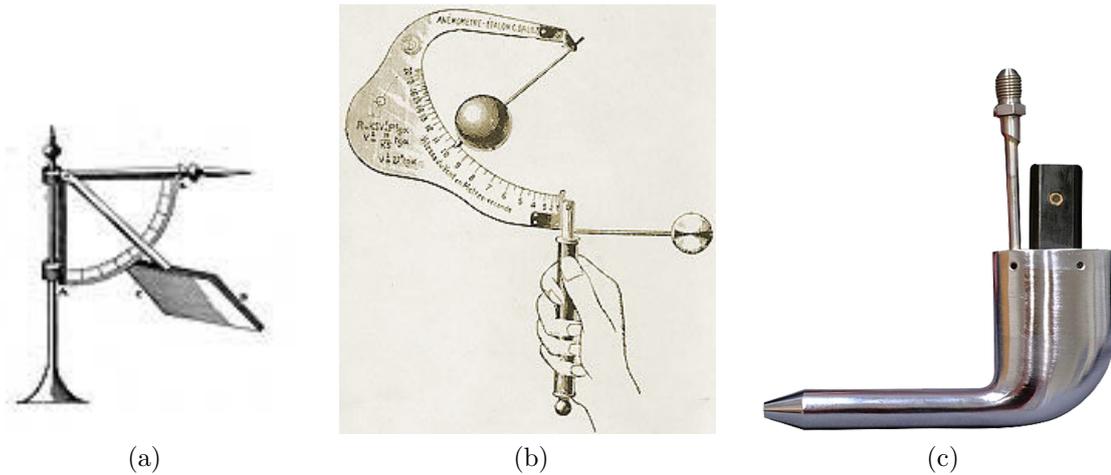


FIGURE 2.1 – (a) : Plan d'un anémomètre à plaque, d'après Hooke. (b) : Anémomètre de Daloz. (c) : Anémomètre à tube de Pitot.

2.2.1.1.3 À tube : Ne quantifie plus la force de traînée exercée sur le capteur mais la pression dynamique, notée q , exercée par le mouvement relatif du fluide et du capteur.

q est indépendant de la surface de mesure. Il est uniquement fonction de la vitesse relative et de la masse volumique de l'air :

$$q = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (2.3)$$

Cette pression dynamique peut être déterminée à l'aide d'un tube de Pitot (1732) ou bien de l'antenne de Prandtl. Ces dispositifs permettent de déterminer q en différenciant la pression totale P_t , pression mesurée à l'orifice du capteur, et la pression statique P_s , pression ambiante.

d'où, d'après (2.3) :

$$V_{mes} = \sqrt{\frac{2q}{\rho}} = \sqrt{\frac{2(P_t - P_s)}{\rho}} \quad (2.4)$$

Ce dispositif comporte les inconvénients suivants :

- Erreur sur la densité, la mesure étant fonction de la densité de l'air, il faut savoir en faire une estimation précise.
- Erreur de compressibilité, ne s'applique pas dans le cadre de cette thèse, mais le principe de mesure utilise la relation de Bernoulli qui n'est valable que pour un écoulement incompressible. Soit pour l'air, quand la vitesse est inférieure à 220nds.
- Erreur sur P_t , lorsque l'orifice du capteur est obstrué, partiellement ou totalement.

Si l'on ne s'intéresse pas à quantifier la vitesse absolue mais que l'on cherche à mesurer un angle, à l'aide de deux capteurs en quadrature par exemple, alors la mesure de la densité n'est plus nécessaire. L'angle d'incidence s'obtient à partir de l'arc tangente des deux pressions totales mesurées, les capteurs étant soumis à la même pression statique et à la même densité. Cette approche est employée sur certaines des ailes rigides des AC50s.

L'un des avantages mis en évidence par [Pinkerton, 1930], est que ce type de capteur ne dispose pas de pièces mobiles. Ainsi, son temps de réponse est inférieur aux dispositifs possédant des pièces en mouvement.

Étant donné les contraintes environnementales, et du fait que le tube nécessite d'être orienté dans l'axe du flux, ce type d'instrument est le plus souvent utilisé en aviation ou bien en soufflerie.

2.2.1.2 Anémomètre à coupelles

C'est Thomas Romney Robinson (1792-1862), un astronome Irlandais, qui eut l'idée d'utiliser un capteur composé de 4 coupelles hémisphériques (1846). L'axe de rotation du capteur est orienté perpendiculairement au flux à mesurer. La vitesse du vent est déterminée à partir de la vitesse de rotation de l'élément tournant (cf. Figure (2.2a)).

Le fonctionnement détaillé de cet instrument sera présenté dans la section 2.3.

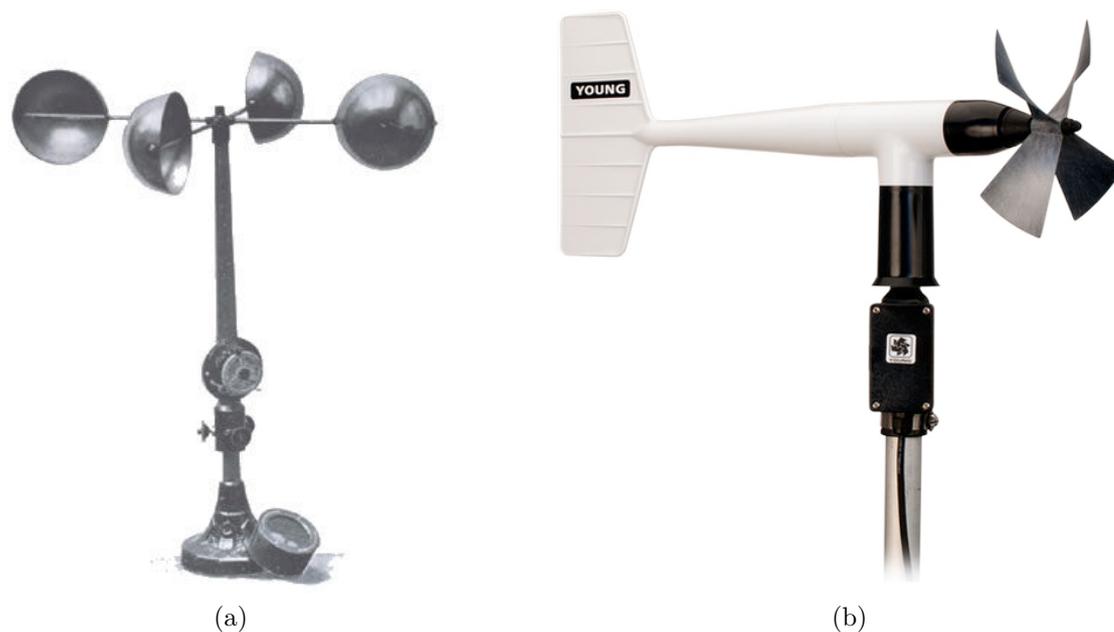


FIGURE 2.2 – (a) :Anémomètre de Romney. (b) :Anémo-girouette à hélices *Young*^{MD}.

2.2.1.3 Anémomètre à ailettes

L'intérêt des anémomètres à ailettes est que la réponse du rotor est réactive et symétrique. Bien que la vitesse de rotation soit linéaire par rapport à la vitesse du vent, elle n'est sensible qu'à la composante parallèle à l'axe de rotation de son hélice (cf. Figure (2.2b)). Ce comportement peut être intéressant pour mesurer la composante verticale du vent réel lorsque l'instrument est monté sur un mât de mesure. Par contre, lorsqu'il s'agit de mesurer la vitesse du vent apparent, il faut aligner le capteur avec la direction du vent.

Le délai sur la réponse angulaire implique une sous-évaluation de la vitesse du vent. Ce biais est dépendant de l'amplitude des turbulences et du matériel mais peut être compris entre 1 et 4% pour des capteurs d'instrumentation placés sur un mât de mesure atmosphérique [Horst, 1973] et [Monna et Driedonks, 1978]. Un second grief est que la vitesse de démarrage est conditionnée par l'orientation de l'ensemble. Il faut d'abord que le vent souffle suffisamment fort pour orienter l'hélice dans le flux.

Concernant la mesure de la direction du vent, l'hélice étant montée en amont de l'axe de rotation de la girouette, sa prise au vent crée un déséquilibre instable. De plus, le mauvais alignement mécanique du rotor cause une erreur sur la lecture de la direction difficilement quantifiable.

2.2.1.4 Fil-chaud

Un fil très fin (de l'ordre de $5\mu m$) est chauffé par effet Joule, à une température d'environ 20° supérieure à la température ambiante. Le transfert d'énergie sous forme de chaleur entre le fil et l'air, réalisé par conduction, peut être caractérisé par le nombre de Nusselt Nu , nombre sans dimension [Dulieu *et al.*, 1999] : Nu étant proportionnel au flux de chaleur et donc à la puissance RI^2 mais aussi au nombre de Reynolds, lui-même fonction de la vitesse du fluide. Il est alors possible de faire le lien entre la vitesse du fluide et la résistance du fil. C'est cette résistance que l'on va estimer en mesurant la tension du fil chaud, placé par exemple dans un pont de Wheatstone.

La très faible inertie thermique du fil fait qu'il est possible de mesurer des variations très rapides de la vitesse du vent, de l'ordre du kHz. Par contre, il est nécessaire de connaître précisément la température l'air. Ce type de capteur est alors principalement adapté aux souffleries car le fil est également très fragile. Il faut aussi savoir que la réponse à l'orientation du flux n'est pas en cosinus et que le capteur souffre d'un offset pour les très faibles vitesses.

2.2.1.5 Ultrason

La mesure par ultrason a débuté en 1949 par l'idée de mesurer la température de l'air [Barrett et Suomi, 1949] :

$$C_s = 20.067\sqrt{T + 274.15} \quad (2.5)$$

Normalement, la vitesse du son C_s est aussi fonction de l'humidité et de la pression mais est négligée dans l'équation (2.5). L'erreur induite étant inférieure à 0.2% dans les conditions atmosphériques usuelles.

Les premiers anémomètres à ultrason sont quant à eux apparus à la fin des années 50, [Schotland, 1955] et [Mitsuta, 1966]. Ils utilisent le principe du temps de vol entre un émetteur et un récepteur séparés d'une distance connue. Ils sont sensibles à la température de l'air et leur précision devient acceptable au début des années 80, [Hanafusa *et al.*, 1982].

2.2.1.5.1 Temps de Vol : La vitesse du son peut être obtenue soit en mesurant le délai entre l'émission et la réception d'un signal par les transducteurs, soit en mesurant son déphasage. Le délai Δt_1 entre l'émission d'un son sur le transducteur et sa réception sur l'autre est fonction de la vitesse du son C_s , de la distance d qui les sépare et de V , la vitesse de déplacement de l'air dans la direction du récepteur :

$$\Delta t_1 = \frac{d}{C_s + V} \quad (2.6)$$

Inversement, le délai pour le trajet du son dans le sens inverse :

$$\Delta t_2 = \frac{d}{C_s - V} \quad (2.7)$$

D'après (2.6) & (2.7), la vitesse du vent suivant la composante axiale entre les 2 transducteurs peut être déterminée indépendamment de la vitesse du son :

$$V = \frac{d}{2} \left(\frac{1}{\Delta t_1} - \frac{1}{\Delta t_2} \right) \quad (2.8)$$

Suivant le même principe, la vitesse peut être obtenue à partir du déphasage entre le signal émis et reçu. Cette deuxième approche était préférée sur les premiers capteurs car plus facile à réaliser avec des composants analogiques. Expliqué en 1963 par [Kaimal et Businger, 1963], le principe a été repris et détaillé plusieurs fois depuis, ex : [Larsen *et al.*, 1978].

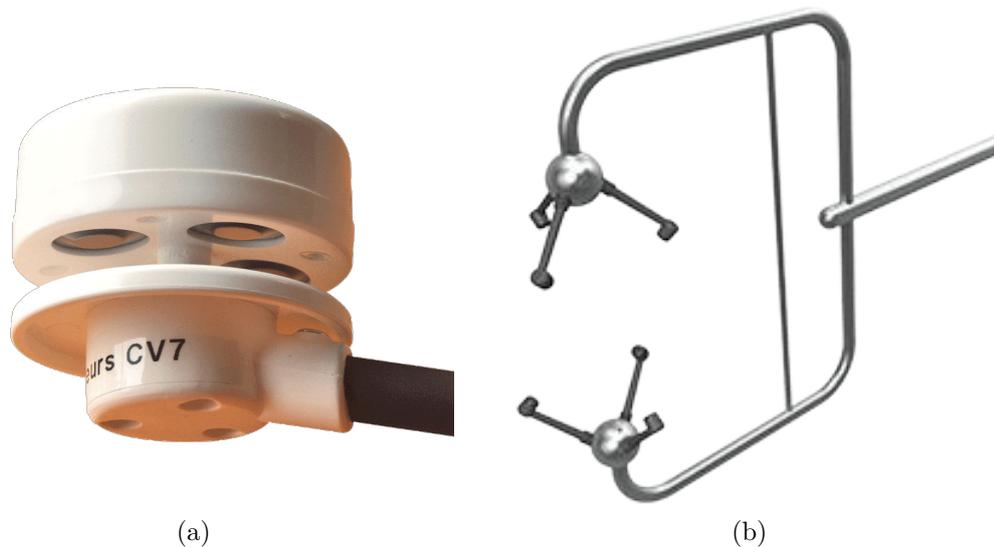


FIGURE 2.3 – (a) :Anémomètre ultrasonique 2D à résonance acoustique LCJ^{MD} . (b) :Anémomètre ultrasonique 3D $GILL^{MD}$.

2.2.1.5.2 Résonance acoustique : On retrouve deux brevets déposés la même année, l'un au États-Unis par [Kapartis, 1999], l'autre en Europe par [LAMIRAUX, 1999]. Ce dernier sera ensuite utilisé par la société [LCJ Capteurs, 2014] et mis à jour en 2008 [LAMIRAUX, 2008], voir Figure (2.3a). Ce principe de mesure n'est donc pas libre actuellement.

L'onde émise résonne stationnairement dans une cavité dont la hauteur est fonction de la demi-période de l'onde émise. Sur le même principe que le temps de vol, le signal vu par les récepteurs va être déphasé en fonction de la vitesse du vent traversant la cavité. L'intérêt est

de proposer un capteur plus compact dont la mécanique est plus robuste et facile à construire. Toutefois, la précision reste perfectible. La Figure (2.4) montre la précision du capteur (2.3a).

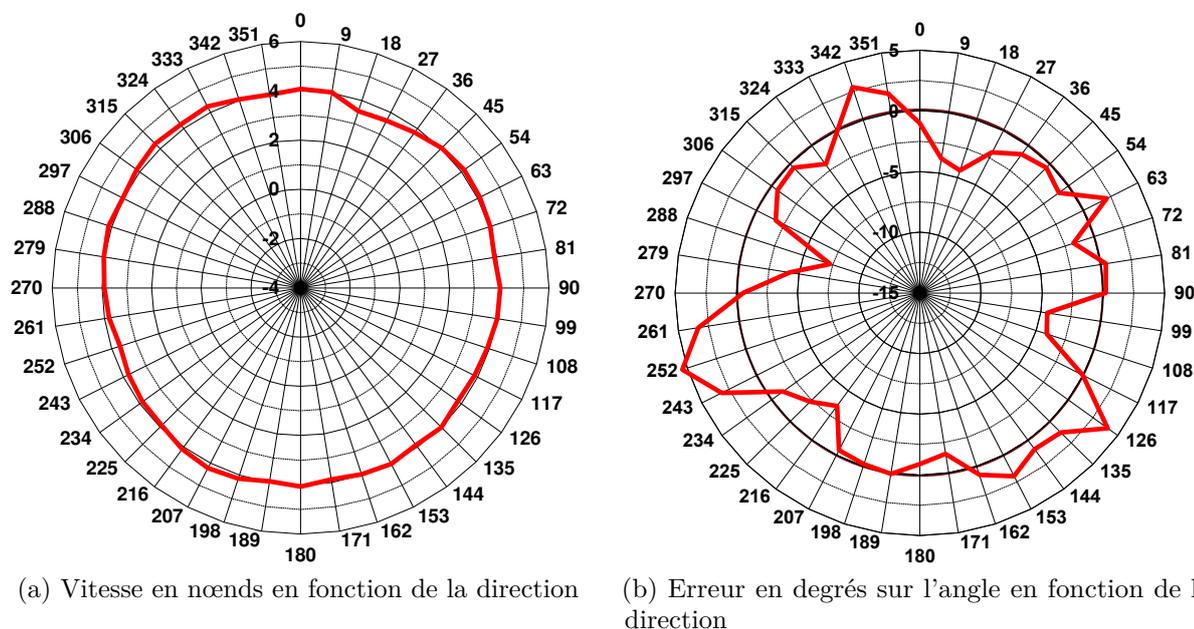


FIGURE 2.4 – Essais en soufflerie pour l’anémomètre CV7 de [LCJ Capteurs, 2014]. La mesure est effectuée en soufflerie pour une vitesse de 4nds . (a) : La mesure en vitesse est correcte puisque l’écart type est de 4%. (b) : La mesure en direction est mauvaise car l’écart type de l’erreur est de 2.54° .

2.2.1.5.3 Avantages : L’intérêt des anémomètres ultrasoniques est qu’ils ne reposent pas sur des pièces mobiles, ils sont donc robustes et ne sont pas sujets au retard mécanique. Un autre avantage est qu’à la manière du capteur de la Figure (2.3b), il est possible de mesurer le vent dans les 3 dimensions.

Ce capteur est vendu 3000 euros, mesure à une fréquence de 20Hz et dispose des caractéristiques suivantes :

- Mesure de la vitesse sur la plage $[0,87\text{nds}]$ avec une précision inférieure à 1%.
- Mesure de la direction avec une précision inférieure à 1° .

Ce type de produit est très intéressant car sa réactivité et sa précision permettent de mesurer le niveau de turbulence du vent. Cependant, il n’existe pas aujourd’hui de produits adaptés au monde de la voile. Ce sont des capteurs dédiés à l’instrumentation scientifique. Ils pèsent au mieux 1kg et leur coût de fabrication est tel que le prix de vente n’est pas adapté au marché du nautisme.

2.2.1.5.4 SODAR : pour Sonic Detection And Ranging, est un instrument de mesure de la vitesse et direction du vent à distance, contrairement aux capteurs ultrasonique précédemment cités, qui mesurent le vent qui les traverse (on parle de mesure ponctuelle). Le SODAR est capable d'effectuer son point de mesure à plusieurs dizaines de mètres. Il émet un son, généralement dans la bande de fréquence $[400, 4000]hertz$, puis écoute la réponse. C'est le décalage en fréquence de la réponse qui permet, par effet Doppler, de déterminer la vitesse radiale du vent.

La focalisation du son peut se faire avec des haut-parleurs paraboliques ou bien avec des antennes réseaux à commande de phase. Pour obtenir un vecteur en 3 dimensions de la vitesse du vent, il faut effectuer au moins 3 points de mesure. En général, les antennes sont orientées avec un angle par rapport à la verticale de 30° . La mesure n'est alors plus ponctuelle mais en volume, cf. Figure (2.5). La qualité de la mesure obtenue avec ce type de matériel est sensible à la fréquence et la puissance émise, à la stabilité atmosphérique, ainsi qu'aux turbulences et au bruit acoustique environnant. Son fonctionnement est détaillé dans le rapport de [Cliff, 1975]. Un appareil mesurant jusqu'à une hauteur de 200m consomme environ 10watts. Ce type de matériel est suffisamment précis pour fournir des informations moyennées sur 10 minutes, la référence en météorologie, mais n'est pas capable de fournir des données instantanées précises, à cause du principe de la mesure en volume [GAYNOR, 1994].

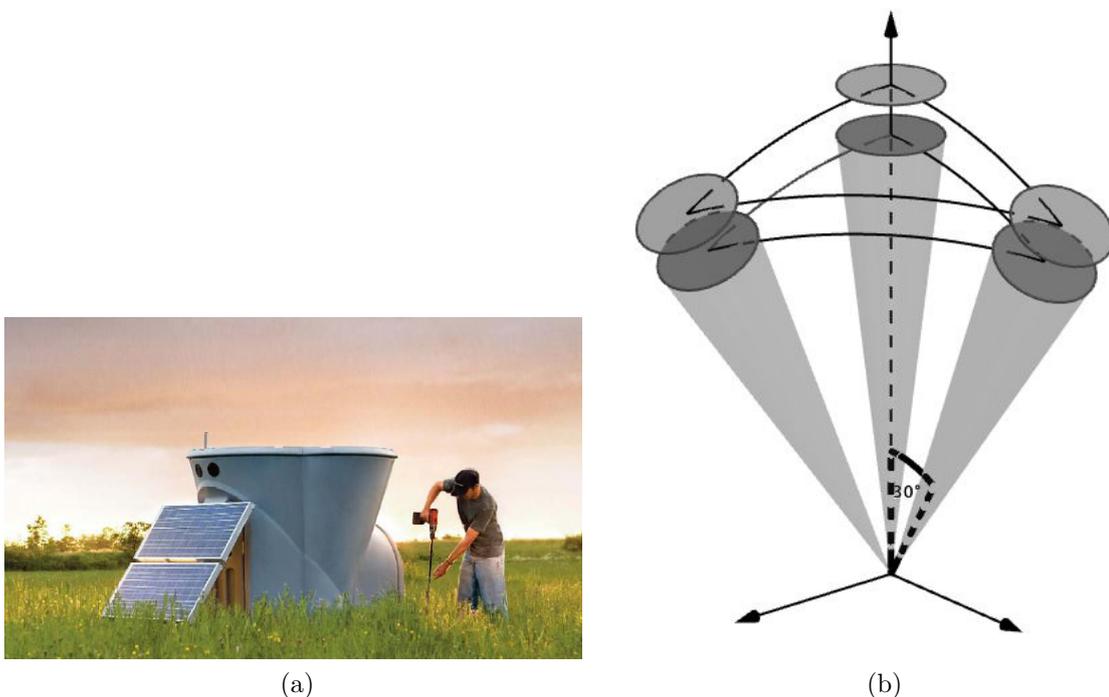


FIGURE 2.5 – (a) : Sodar *Triton*^{MD} pouvant faire un profil vertical de 200m. (b) : Faisceaux acoustiques des 3 transducteurs et volume d'incertitude de la mesure qui est fonction de la hauteur du tir.

2.2.1.6 LIDAR

LiDAR pour Light Detection And Ranging, utilise un ou des faisceaux lasers pour mesurer la vitesse des particules présentes dans l'air. Comme pour le SODAR, il mesure la vitesse radiale suivant la direction du faisceau. Pour reconstruire un vecteur en 3 dimensions il faut plusieurs points de mesure. Ce dispositif est donc également un appareil de mesure en volume. La précision du vecteur reconstitué est ainsi dépendante de l'espacement des différents points de mesure. Plus l'espacement est grand, plus la résolution de la mesure est précise. Par contre, plus le volume de mesure est important, moins la donnée est ponctuelle. Ces appareils disposent maintenant d'un système de visée permettant d'effectuer un balayage dynamique. La programmation du volume à scruter dépend du type d'informations que l'on souhaite obtenir. Lorsque l'on cherche à quantifier le gradient et le cisaillement vertical, le faisceau effectue des mesures sur des cercles concentriques à plusieurs altitudes. Le cône de tir est en général de 20° . Il est aussi possible de faire un balayage à l'horizontal, par exemple lorsque que l'on souhaite cartographier un plan d'eau.

Un appareil qui tire à 3Km, pèse aujourd'hui $50kg$, consomme $50watts$, pour un encombrement de $50cm^3$ et coûte environ 150k euros. Pour une précision en vitesse à $\pm 2\%$ et 5° en direction lorsque les mesures sont moyennées sur 10 minutes.

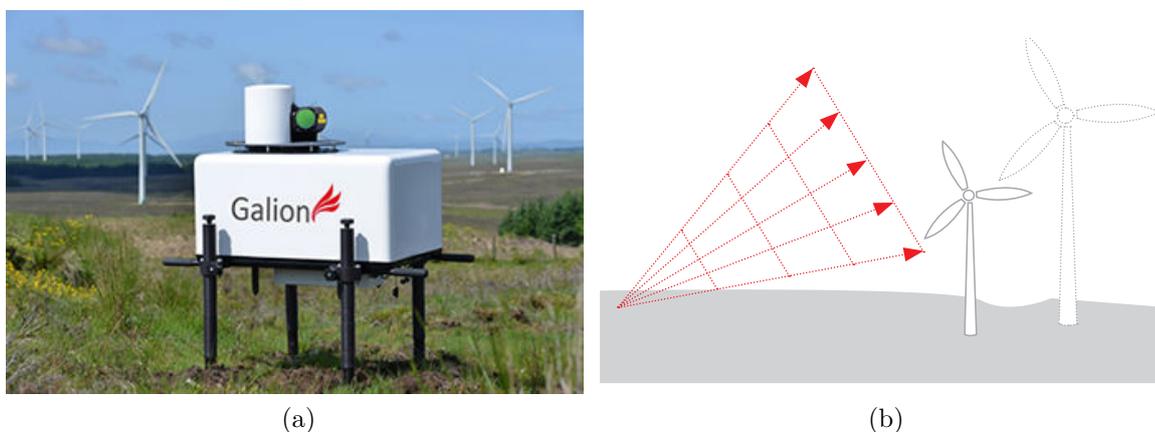


FIGURE 2.6 – (a) : Lidar de la marque *Galion*^{MD} doté d'une tête laser motorisée. (b) : Exemple de balayage et quadrillage du laser. Ici une coupe verticale, utilisée pour voir les flux verticaux.

Contrairement au SODAR, le LIDAR n'est pas dépendant des variations des paramètres de l'atmosphère puisqu'il se base sur les caractéristiques de la lumière. Il n'y a pas de problème de calibration sur la masse volumique et la pression. La résolution temporelle est aussi améliorée car l'acquisition d'un point de mesure est plus rapide ($< 1s$) et le capteur utilise un faisceau laser, contrairement au SODAR qui est dépendant du diagramme de rayonnement des haut-parleurs. Les performances du LIDAR sont comparées avec celles du SODAR dans [Congeduti *et al.*, 1981] et [Casadio *et al.*, 1996].

2.2.1.7 RADAR

Les RADARs profileurs météorologiques fonctionnent sur le même principe que les SODARs et les LIDARs. Ils mesurent plusieurs vitesses radiales, cette fois à l'aide d'ondes électromagnétiques dans des bandes de fréquences comprises entre 50 et 1000MHz. La résolution spatiale est proportionnelle à la fréquence de la porteuse mais plus la fréquence est élevée, moins la portée est grande.

Le radar est sensible aux turbulences d'une taille égale à la moitié de sa porteuse, soit 40cm pour un RADAR UHF. Étant donné que ces turbulences sont considérées comme portées par le flux global, la vitesse moyenne est estimée à partir de plusieurs échantillons [Ecklund *et al.*, 1988]. Ce type d'appareil reste donc un capteur volumétrique et n'est valable que lorsque l'on souhaite travailler sur des vitesses moyennes.

2.2.1.8 Conclusion

Il existe donc deux familles de capteurs pour la mesure de la vitesse du vent. Les capteurs disposant de parties mobiles, qui ne mesurent que la vitesse. Et les capteurs sans éléments en mouvements, qui effectuent plusieurs points de mesure plus ou moins distants entre eux. Ces derniers sont alors capables de reconstruire un vecteur, en 2 ou 3 dimensions, suivant l'arrangement des points de mesure.

La section suivante s'intéresse aux dispositifs permettant de déterminer la direction du vent, utilisés lorsque le principe de mesure de la vitesse ne fournit pas cette information.

2.2.2 Moyens de mesure de la direction

Nous avons vu que certains des dispositifs de mesure de la vitesse sont capables de déterminer la direction du vent de par leur nécessité d'être orientés dans le flux ou bien par leur principe de mesure en volume. Quand ce n'est pas le cas, il faut estimer la direction à l'aide d'un capteur dédié.

2.2.2.1 Girouette

La girouette est le dispositif traditionnellement utilisé pour indiquer la direction du vent. Un élément prenant prise au vent est monté sur un axe rotatif vertical, l'ensemble s'orientant dans la direction du vent. C'est donc un capteur avec un senseur mobile, généralement de taille importante, donc avec un comportement dynamique marqué.

Les travaux sur ce capteur seront détaillés dans les sections 2.4, 2.5 et 2.6.

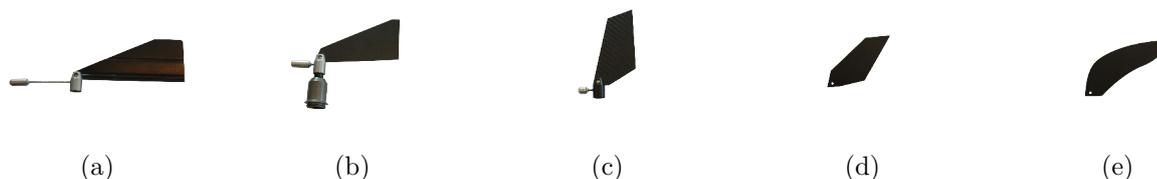


FIGURE 2.7 – Évolution des pales nke suite à des réflexions empiriques.

2.2.2.1.1 Numérisation La vitesse de rotation de la girouette étant relativement faible, ce n'est pas la fréquence d'acquisition qui est le premier critère de choix mais bien la résolution et la précision angulaire. Certains capteurs sont équipés d'encodeurs optiques. nke a fait le choix d'utiliser une technologie à effet hall car la résolution est meilleure pour un encombrement réduit et permet une mécanique plus simple pour assurer l'étanchéité.

La résolution du capteur est passée de $360/512 = 0,7^\circ$ à $0,35^\circ$ en 2007, $0,17^\circ$ en 2011 et sera de $0,09^\circ$ sur la génération en cours de développement.

2.2.2.1.2 Offset d'alignement Le capteur donne la position angulaire de l'élément tournant relativement à sa référence interne. Lors de la fabrication, la référence est calibrée pour que le zéro corresponde à l'axe de l'aérien. L'aérien est ensuite installé via un support, en général en tête de mât. Il en résulte une accumulation d'erreurs d'alignement entre la calibration usine et la ligne de foi du bateau. Nous avons vu dans le Tableau (1.1a) l'influence des erreurs induite par une mauvaise estimation de β_{app} . Il est donc très important d'ajuster l'offset de calibration $O_{\beta_{mes}}$ pour faire correspondre le zéro de β_{mes} avec la ligne de foi du bateau.

Cette étape, souvent négligée, est l'une des sources d'erreur principale sur le calcul du vent réel. Une des techniques de calibration usuelle consiste à comparer la valeur du capteur en navigation entre deux bords au près, puis de modifier l'offset pour que les angles soient identiques sur les 2 bords. Cette technique n'est pas idéale car trop souvent pratiquée en présence de gradient et de cisaillement vertical du vent réel, mais aussi parce que le grément ne se vrille pas toujours symétriquement. L'autre approche nécessite de monter en tête de mât au port et d'aligner manuellement la girouette avec la ligne de foi.

2.2.2.2 Rotavecta

En 1988, Barbeau a expliqué dans son dépôt de brevet [Barbeau, 1988], une méthode et le dispositif associé permettant de mesurer simultanément, à l'aide d'un unique anémomètre à coupelles, la vitesse et la direction du vent.

Le principe est de déséquilibrer le comportement aérodynamique du rotor, par exemple comme sur la Figure (2.8a) par l'ajout d'une languette sur l'un des godets. Ainsi, en déterminant

dans quels secteurs le rotor est accéléré ou décéléré, on peut en déterminer la direction du vent.

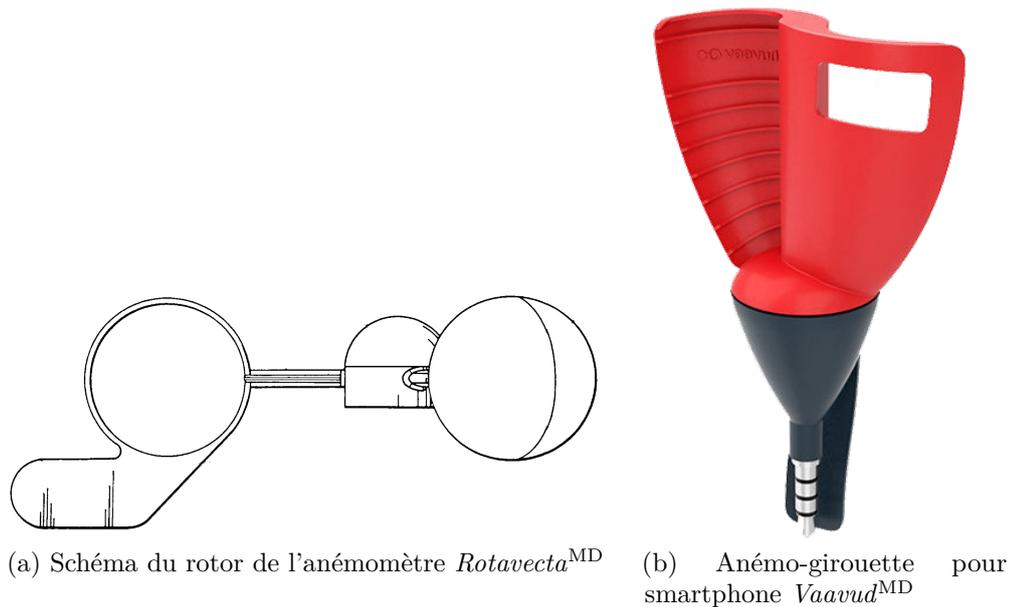


FIGURE 2.8 – Anémomètres asymétriques permettant de déterminer la direction du vent.

Le principe a été redéposé et exploité par *Autohelm*^{MD} [Llewelyn et Johnson, 1994]. L'un des inconvénients, d'ailleurs cité dans le brevet, est que la précision est dégradée lorsque le capteur est incliné. De plus, la précision sur la direction n'est pas très bonne et se dégrade aux faibles vitesses, ce qui fait que ce type de capteur n'est pas adapté aux voiliers. Le brevet ayant expiré en 2014, le principe a été récupéré par *Vaavud*^{MD} qui fabrique des anémomètres pour smartphones, voir Figure (2.8b)

2.2.3 Technologie sélectionnée

Cette revue des technologies aujourd'hui disponibles pour mesurer la vitesse et la direction du vent, nous permet d'écarter celles ayant une résolution spatiale trop insuffisante (SODAR, RADAR), celles ayant une précision insuffisante (ultrason à résonance acoustique, *Rotavecta*), celles non adaptées (tubes de Pitot, fil chaud, LIDAR) et l'anémomètre à ailettes, car il faut l'orienter dans l'axe du vent. Reste alors comme technologie envisageable l'anémo-girouette ultrasonique "temps de vol" et le couple [anémomètre à coupelle ; girouette]. Nous faisons maintenant le choix de continuer à utiliser le capteur traditionnel, bien que ses performances soient, dans l'état actuel, inférieures à celles obtenues avec la technologie ultrasonique "temps de vol". Ce choix est motivé, d'une part par la robustesse éprouvée de ce

type de capteur et d'autre part par la maîtrise de son coût de fabrication. Ce choix est justifié par l'hypothèse que ce déficit de performance, dû aux parties mobiles, peut être corrigé grâce un travail d'optimisation des formes des senseurs, puis par du traitement du signal, ramenant la performance à un niveau au moins équivalent à celui des capteurs ultrasoniques. Le détails de ces travaux est l'objet de la suite de ce chapitre et son organisation peut être résumée par la Figure (2.9). Les principaux travaux nécessaires à l'amélioration de la mesure du vent apparent y sont représentés et identifiés par leur section de description dans le manuscrit.

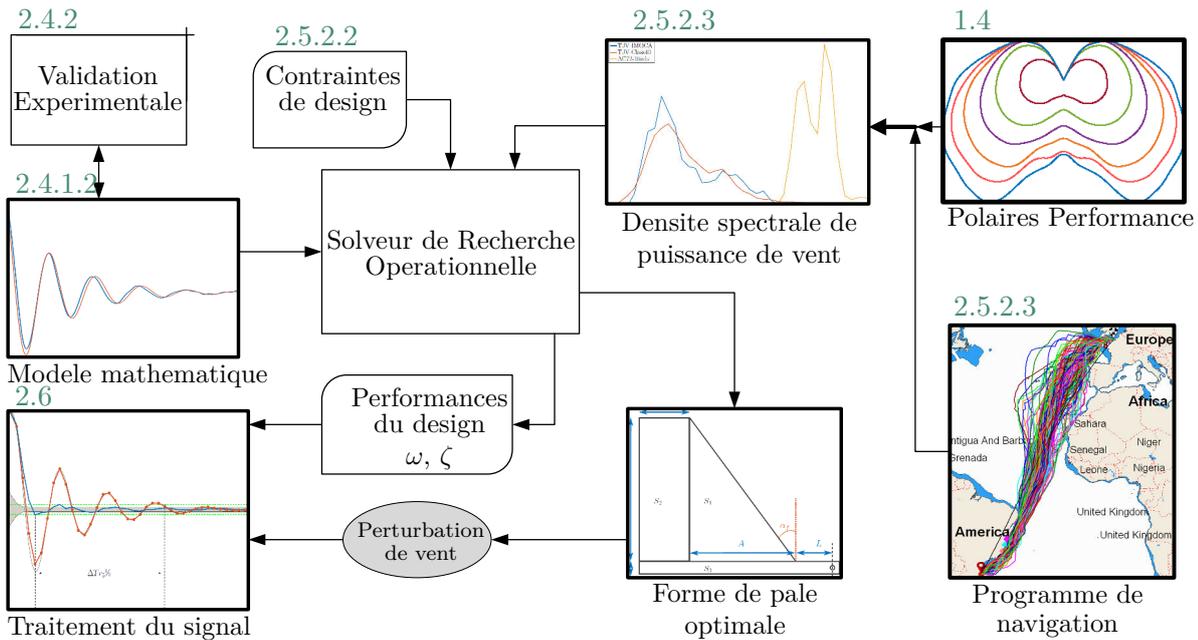


FIGURE 2.9 – Diagramme représentant l’articulation des différents travaux organisés autour du solveur d’optimisation, dont l’objectif global est l’amélioration de la qualité de l’information de vent apparent.

2.3 L'anémomètre à coupelle

L'anémomètre à 3 branches est le capteur de vitesse de vent le plus utilisé dans le monde de la voile. C'est un capteur robuste et simple à fabriquer. Son comportement est linéaire en régime établi et n'est pas dépendant de la densité, ni de la température de l'air.

Au vu de l'état de l'art des technologies disponibles, il a été décidé de conserver ce principe de mesure et de l'améliorer par le design et/ou par le traitement du signal.

Cette section détaille les caractéristiques et les phénomènes qui rentrent en jeu lorsque l'on utilise ce type de capteur. Ces informations seront utiles pour l'étape de traitement du signal, et également lors de la mise en œuvre sur le voilier.

2.3.1 Caractéristiques de l'écoulement de l'air sur une coupelle

L'écoulement d'un fluide autour d'un profil peut être :

- Rampant
- Laminaire
- Transitoire
- Turbulent

Ce régime d'écoulement du fluide dépend de la valeur du nombre de Reynolds qui représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses, cf. équation (1.1).

Re est fonction de L , la dimension caractéristique en mètre :

$$L = \frac{S}{P} \quad (2.9)$$

Avec : P le périmètre de la surface du profil projetée sur un plan perpendiculaire à la vitesse du fluide, en mètre.

Dans le cas d'une coupelle, la surface mouillée vaut :

$$S = \Pi r^2 \quad (2.10)$$

Et le périmètre :

$$P = 2\Pi r \quad (2.11)$$

Avec (2.10), (2.9) et (2.11), (1.1) devient :

$$Re = \frac{2\rho V r}{\mu} \quad (2.12)$$

- Pour $Re < 30$, l'écoulement est laminaire, la force de traînée exercée sur le profil est proportionnelle à V .
- Pour $30 < Re < 800$, l'écoulement est transitoire, la force de traînée exercée sur le profil est proportionnelle à $V^{1,4}$.
- Pour $Re > 800$, l'écoulement est turbulent, la force de traînée exercée sur le profil est proportionnelle à V^2 .

Application numérique pour un coupelle de 1,5cm dans l'air :

$$V_{app} = 1\text{m/s}$$

$$r = 0,015\text{m}$$

$$\rho = 1,204\text{kg/m}^3$$

$$\mu = 1,8 \times 10^{-5}\text{Pa.s}$$

Donne $Re = 825$: l'écoulement est turbulent. La force de traînée exercée sur la coupelle est proportionnelle à V^2 . C'est pour cette gamme de Reynolds que les coefficients de portance des godets devront être estimés.

2.3.2 Coefficient de portance et de traînée

La performance en dynamique du moulinet est dépendante du ratio entre le coefficient de portance des godets lorsqu'ils sont poussés ou au contraire ralentis par le vent.

2.3.2.1 Pour un angle d'incidence de $\pm 90^\circ$

D'après les tests effectués par [Brevoort et Joyner, 1935] et [Hoerner, 1965] en soufflerie, voici dans le Tableau (2.1) les coefficients des principaux godets utilisés chez nke et dans le monde de la voile. C_{tf} , le coefficient de traînée lorsque le godet fait face au flux et C_{td} , lorsqu'il fait dos au flux. Les godets sont caractérisés en fonction de leur cambrure, soit le ratio entre la flèche et la corde, ici la profondeur h du godet et le diamètre d .

2.3.2.2 Pour un angle d'incidence variable

La Figure (2.10) montre l'évolution du coefficient de portance normale des godets C_N , en fonction de l'angle d'incidence α_i .

Lorsque le godet n'est pas orienté directement face ou dos au vent, il génère une force de portance qu'il faut prendre en compte, (cf. Figure (1.1b)).

Il est intéressant de noter que le changement de signe ne s'effectue pas pour $\alpha_i = 90^\circ$ mais plutôt pour $\alpha_i = 80^\circ$.

Les courbes sont valables l'une pour un godet en forme de demi-sphère, l'autre pour une forme

Coeffs	nke-Monobloc	Raymarine ^{MD}	Plastimo ^{MD}
d	24	30	28
h	9	15	16
h/d	0,375	0,5	0,57
C_{tf}	1,38	1,42	1,33
C_{td}	0,42	0,38	0,36
C_{td}/C_{tf}	0,30	0,26	0,27
K	3,42	3,08	3,16

TABLE 2.1 – Coefficients caractéristiques des godets des principaux anémomètres du nautisme. Bien que les dimensions et formes soient très proches, le coefficient anémométrique K (défini par l'équation (2.20)), nous indique que le moulinet nke tourne 10% moins vite que le Raymarine.

conique. Toutes deux pour un Reynolds de 1000, obtenues d'après les travaux de [Brevoort et Joyner, 1934].

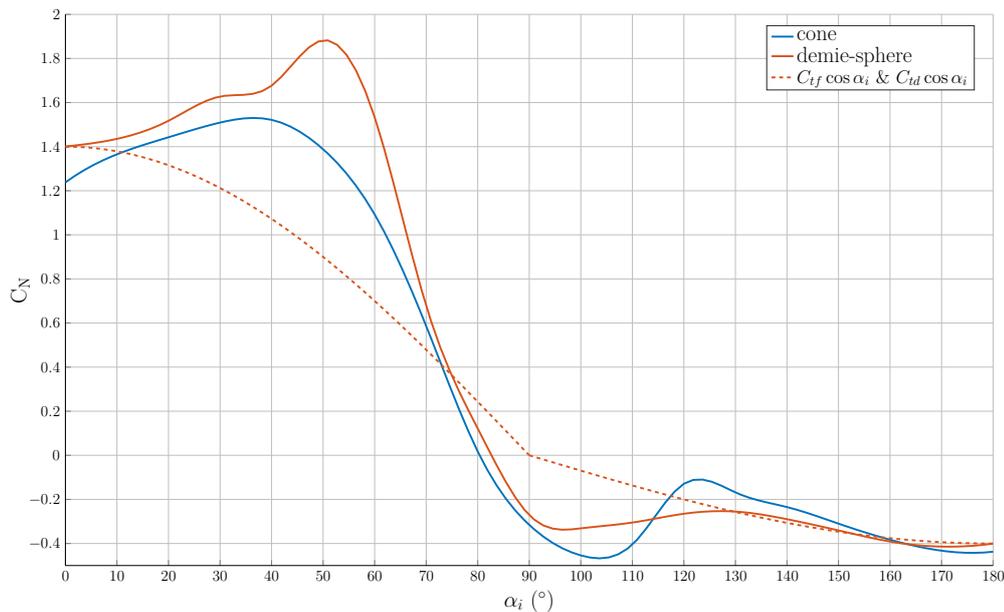


FIGURE 2.10 – Évolution du coefficient de portance normale C_N des godets en fonction de l'angle d'incidence α_i , d'après [Brevoort et Joyner, 1934]. La courbe en pointillés montre l'erreur commise lorsque l'on ne prend en compte que les forces de traînée et que l'on ne considère pas la composante générée par la portance : $C_p \sin \alpha_i$.

Ces données de portance vont être utiles pour décrire le comportement dynamique du moulinet.

2.3.3 Rotor symétrique

Une première modélisation peut être faite en considérant que le rotor est symétrique : c'est-à-dire avec un godet de face à 90° et un autre de l'autre côté de l'axe de rotation de dos.

2.3.3.1 Moment des forces exercées sur les coupelles de l'anémomètre

Les Figures (2.11) & (2.12) illustrent les efforts en jeu sur le moulinet et sont utiles pour la compréhension des équations suivantes.

Le moment dû aux efforts aérodynamiques s'exerçant sur l'un des godets de l'anémomètre peut s'écrire d'après (1.2) :

$$\mathcal{M}_c = \frac{1}{2}\rho V^2 C_t S \times R_r \quad (2.13)$$

Avec R_r le rayon du rotor.

D'après le théorème du moment d'inertie et [International Electrotechnical Commission, 2005], la réponse d'un anémomètre peut être obtenue d'après la somme des moments projetés sur l'axe de rotation de l'anémomètre :

$$I\ddot{\theta} = \mathcal{M}_A + \mathcal{M}_F \quad (2.14)$$

Avec :

I Le moment d'inertie du rotor en $kg.m^2$

\mathcal{M}_A Le couple aérodynamique en $N.m$

\mathcal{M}_F Le couple de frottements en $N.m$

θ La position angulaire du rotor en *radians*

$$\mathcal{M}_A = \frac{1}{2}\rho S N (C_{tf}(V - \dot{\theta}R_r)^2 - C_{td}(V + \dot{\theta}R_r)^2) \quad (2.15)$$

Avec N le nombre de godets.

Si le couple de frottement est négligé et que le rotor est à l'équilibre, alors d'après (2.14) et (2.13) :

$$\mathcal{M}_{cf} = \mathcal{M}_{cd} \quad (2.16)$$

$$\frac{1}{2}\rho(V - \dot{\theta}R_r)^2 S C_{tf} = \frac{1}{2}\rho(V + \dot{\theta}R_r)^2 S C_{td} \quad (2.17)$$

Alors (2.17) peut être simplifié pour obtenir la fonction de transfert de l'anémomètre :

$$V = \left(\frac{1 + \sqrt{C_{td}/C_{tf}}}{1 - \sqrt{C_{td}/C_{tf}}} \right) \dot{\theta} R_r \quad (2.18)$$

$$V = \left(\frac{1 + \sqrt{C_{td}/C_{tf}}}{1 - \sqrt{C_{td}/C_{tf}}} \right) 2\pi R_r f_r \quad (2.19)$$

Avec :

\mathcal{M}_{cf} Le couple du godet faisant face au flux.

\mathcal{M}_{cd} Le couple du godet faisant dos au flux.

f_r La fréquence de rotation du rotor en Hz

Cette fonction de transfert permet de définir le facteur anémométrique, utilisé pour caractériser la vitesse de rotation du moulinet.

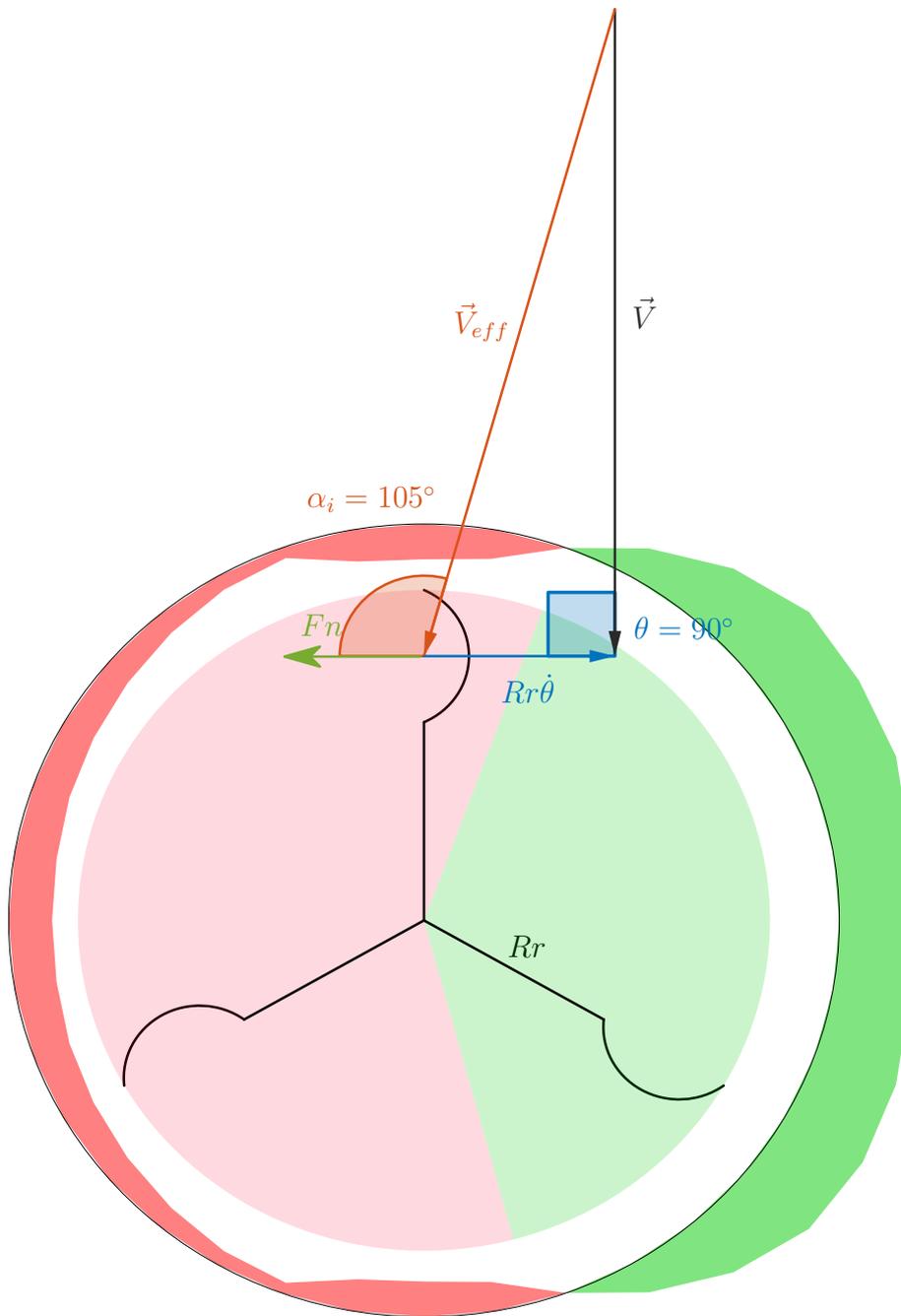


FIGURE 2.11 – Schéma des forces exercées sur l'anémomètre. Le vecteur \vec{V} représente le vent réel, celui que l'on cherche à mesurer. Le vecteur \vec{V}_{eff} le vent apparent ressenti par la coupelle, composition de \vec{V} et de la vitesse radiale du godet $Rr\vec{\theta}$, voir les équations (2.24) & (2.27). θ la position angulaire du godet par rapport à la direction du vent réel et α_i l'angle d'incidence du vent apparent sur le godet. F_n est la force aérodynamique normale exercée par \vec{V}_{eff} sur le godet. F_n est fonction du coefficient de portance normale, dont l'évolution en fonction de α_i est visible sur la Figure (2.10) et retranscrite sous forme "polaire" à la périphérie du schéma. On remarque que le godet est plus souvent dans une zone avec une force aérodynamique contre-rotative (zone rouge) que dans une zone où la force aérodynamique est orientée dans le sens de rotation du rotor (en vert). Bien que la zone rouge soit plus étalée, en régime établi, leurs surfaces sont identiques. La Figure (2.12) montre la composition vectorielle pour des θ différents.

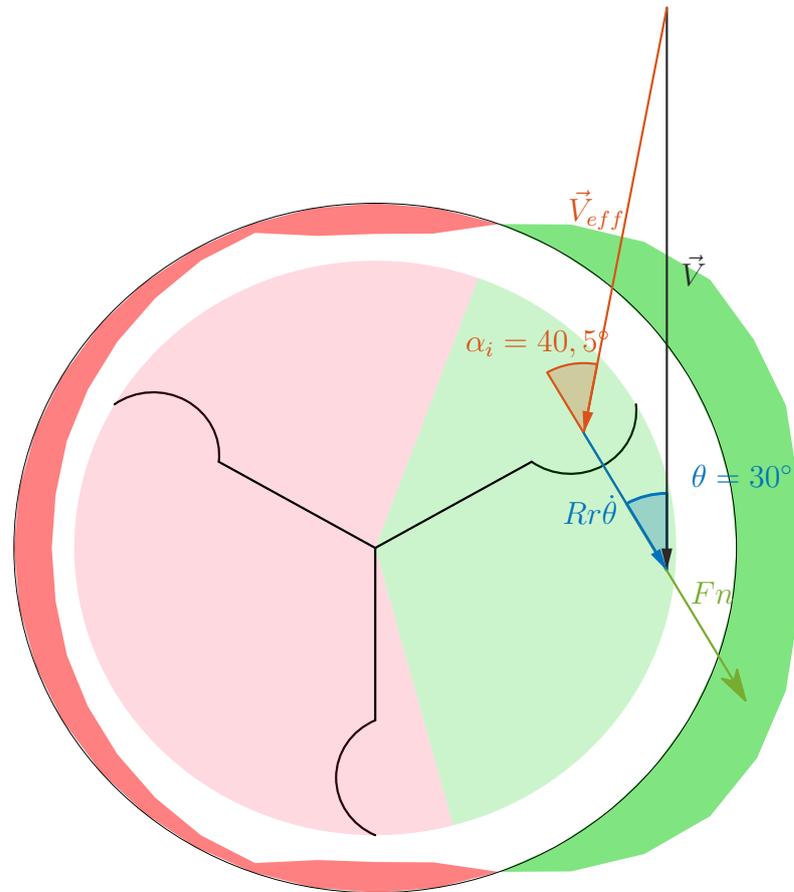
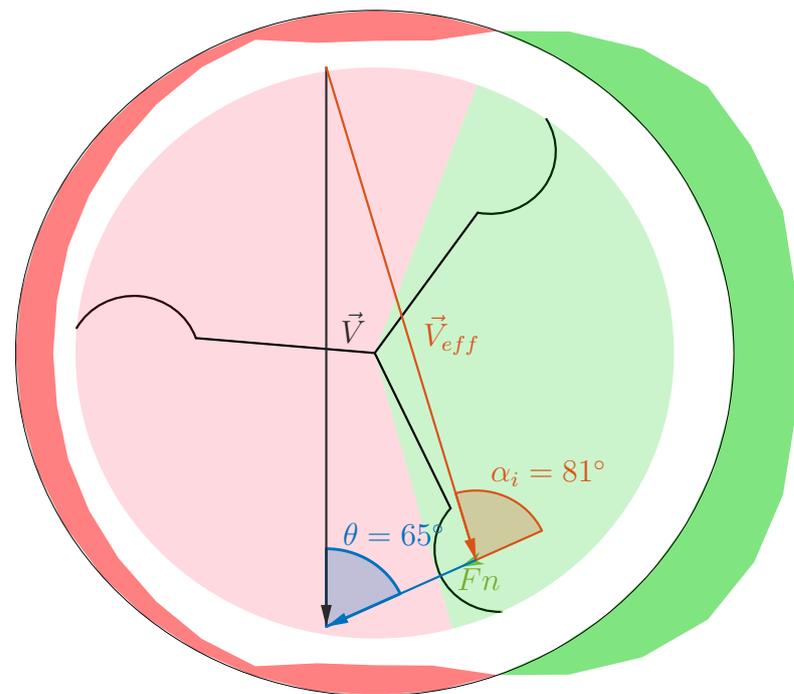
(a) $\theta = 30^\circ$ (b) $\theta = 65^\circ$

FIGURE 2.12 – Mêmes schémas que la Figure (2.11) mais pour des positions de rotor θ différentes. (a) : La force aérodynamique normale F_n est maximale pour $\theta = 30^\circ$. (b) : Bien que θ soit à 65° de la position parallèle au vent, l'angle de vent apparent α_i , n'est lui plus qu'à $90 - 81 = 9^\circ$. Le couple aérodynamique exercé par ce godet est quasiment nul et s'apprête à devenir négatif.

2.3.3.2 Facteur anémométrique

Le ratio entre la vitesse du vent à la vitesse tangentielle des godets est appelé le facteur anémométrique K et s'obtient d'après (2.19) :

$$K = \frac{V}{\dot{\theta}R_r} = \frac{1 + \sqrt{C_{td}/C_{tf}}}{1 - \sqrt{C_{td}/C_{tf}}} \quad (2.20)$$

L'équation (2.20) nous indique que ce facteur est uniquement fonction du rapport entre le coefficient de traînée de la face convexe et de la face concave du godet. [Kristensen, 1998], a fait des tests sur des anémomètres du commerce et trouve que ce facteur K reste compris entre 2,97 et 3,54.

K a été rajouté au Tableau (2.1) pour les godets usuels. Plus le ratio est grand, moins le moulinet tournera vite.

Cette modélisation assume que le moulinet est symétrique, or ce n'est pas le cas puisqu'il est composé de 3 branches.

2.3.4 Rotor asymétrique

Voici maintenant comment peut être décrit le comportement du moulinet lorsque l'on considère sa dissymétrie.

2.3.4.1 Étude du démarrage de l'anémomètre

Hypothèses simplificatrices : pour le cas de l'étude du démarrage on se permet de faire les simplifications suivantes : non prise en compte de l'effet de masquage, non prise en compte de l'influence des bras et du moyeu des moulinets.

Lorsque $[-90 \text{ deg} < \theta < +90 \text{ deg}]$, le moment est positif, la vitesse apparente tangentielle à la coupelle peut s'écrire :

$$V_f = V \cos \theta - \dot{\theta}R_r \quad (2.21)$$

Lorsque $[+90^\circ < \theta < +270^\circ]$, le moment sur une coupelle est négatif :

$$V_d = -V \cos \theta + \dot{\theta}R_r \quad (2.22)$$

2.3.4.1.1 Moment résultant dû aux 3 coupelles

$$\mathcal{M}_A(\theta) = \mathcal{M}_c(\theta) + \mathcal{M}_c(\theta + 120^\circ) + \mathcal{M}_c(\theta + 240^\circ) \quad (2.23)$$

(2.21) et (2.22) étant les vitesses apparentes tangentes aux coupelles, une autre représentation étant la vitesse suivant la composante parallèle au flux du vent réel. D'après le théorème d'Al-Kashi :

$$V_{eff}(\theta) = \sqrt{V^2 + (\dot{\theta}R_r)^2 - 2V\dot{\theta}R_r \cos(\alpha_i)} \quad (2.24)$$

Et α_i , l'angle d'incidence du vent apparent :

$$V_{eff} \sin \alpha_i = V \sin \theta \quad (2.25)$$

$$V_{eff} \sin(\alpha_i - \theta) = \dot{\theta}R_r \sin \theta \quad (2.26)$$

$$\tan \alpha_i = \frac{K \sin \theta}{K \cos \theta - 1} \quad (2.27)$$

Dans le cas où l'anémomètre est à l'arrêt, soit $\dot{\theta} = 0$ dans une position quelconque θ , alors (2.23) devient :

$$\mathcal{M}_{Astatique}(\theta) = \frac{1}{8} \rho V^2 S R_r [3(C_{tf} - C_{td}) + (C_{tf} + C_{td}) \cos(3\theta)] \quad (2.28)$$

(2.28) dépendant de θ , le démarrage de l'anémomètre va donc dépendre de sa position initiale.

2.3.4.1.2 Vitesse de vent nécessaire au démarrage de l'anémomètre :

Pour que le moulinet démarre, le couple aérodynamique $\mathcal{M}_{Astatique}(\theta)$, doit vaincre le couple de frottement sec des roulements \mathcal{M}_F .

La vitesse minimale du vent réel pour que l'anémomètre démarre quelle que soit sa position est donnée d'après (2.28) avec $\cos(3\theta) = 0$, par :

$$V_m = \sqrt{\frac{4\mathcal{M}_F}{\rho S R_r (C_{tf} - 2C_{td})}} \quad (2.29)$$

La vitesse du vent réel en dessous de laquelle l'anémomètre ne démarre jamais, quelle que soit sa position, est donnée d'après (2.28) avec $\cos(3\theta) = 1$, par :

$$V_M = \sqrt{\frac{4\mathcal{M}_F}{\rho S R_r (2C_{tf} - C_{td})}} \quad (2.30)$$

Application numérique pour le moulinet nke (cf. (B.1a)) :

$$- \mathcal{M}_F = 32\mu N m$$

- $r = 0,012m$
- $R_r = 0,05m$
- $V_m = 2,9m/s$ soit $5,7nds$
- $V_M = 1,4m/s$ soit $2,7nds$

Pour optimiser la vitesse de démarrage, on peut augmenter la taille des godets ou le rayon du rotor, mais cela va augmenter l'inertie de l'anémomètre. On peut aussi choisir des roulements avec un couple de frottement très faible.

Intéressons-nous maintenant au comportement dynamique du moulinet.

2.3.4.2 Modélisation de la dynamique

Reprenant (2.14), (2.24) et (2.27), l'équation différentielle modélisant le comportement d'un anémomètre à 3 godets peut s'écrire :

$$I\ddot{\theta} = \frac{1}{2}\rho S R_r V_{eff}^2(\theta) C_p(\alpha_i(\theta)) + \frac{1}{2}\rho S R_r V_{eff}^2(\theta+120) C_p(\alpha_i(\theta+120)) + \frac{1}{2}\rho S R_r V_{eff}^2(\theta+240) C_p(\alpha_i(\theta+240)) \quad (2.31)$$

Avec $C_p(\alpha_i(\theta))$ le coefficient de portance (voir Figure (2.10)), fonction de l'angle d'incidence α_i , lui même dépendant de θ .

D'après [Ramachandran, 1969] et amélioré par [Kondo *et al.*, 1971], le comportement de l'anémomètre en régime permanent peut s'écrire d'après la moyenne de (2.31) sur un tour :

$$0 = (V^2 + (\dot{\theta} R_r)^2) \int_0^{2\pi} C_p(\alpha_i(\theta)) d\theta - 2V\dot{\theta} R_r \int_0^{2\pi} C_p(\alpha_i(\theta)) \cos \theta d\theta \quad (2.32)$$

Alors, l'équation (2.32) nous permet de déduire le facteur anémométrique K :

$$K = \frac{b}{a} + \sqrt{\frac{b^2}{a} - 1} \quad (2.33)$$

Avec :

$$\frac{b}{a} = \frac{\int_0^{2\pi} C_p(\alpha_i(\theta)) \cos \theta d\theta}{\int_0^{2\pi} C_p(\alpha_i(\theta)) d\theta} \quad (2.34)$$

La Figure(2.13) montre les résultats de [Pindado *et al.*, 2014], qui ont comparé la précision sur le facteur anémométrique entre un calcul à partir de (2.20) ou (2.33) avec les résultats obtenus en soufflerie.

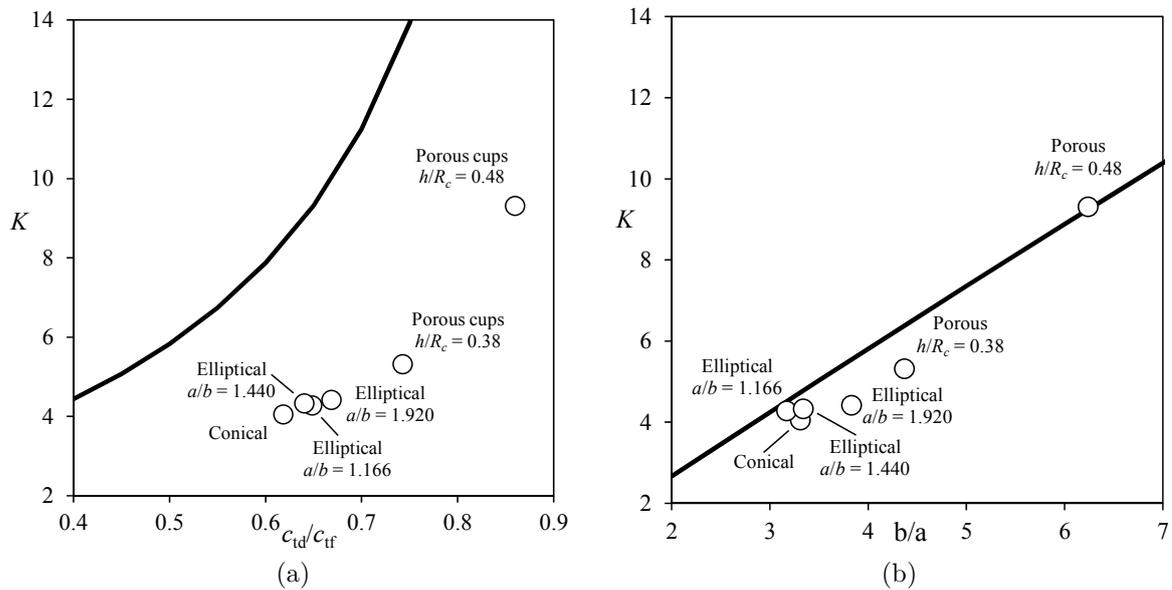


FIGURE 2.13 – Comparaison entre l’obtention du facteur anémométrique K avec la méthode du modèle symétrique (a), ou celle du modèle à 3 coupelles (b), avec les résultats obtenus en soufflerie (rond O). D’après [Pindado *et al.*, 2014].

Voilà pour ce qui est des équations caractérisant le comportement d’un moulinet. Intéressons-nous maintenant aux phénomènes qui affectent son comportement.

2.3.5 Réponse à la gîte

Nous venons de voir dans le paragraphe 1.3.1.1 que le capteur n’est pas soumis à un vent purement horizontal et que sa réponse est considérée comme un cosinus pur. Dans le cas des anémomètres à coupelles, on s’aperçoit qu’en testant les capteurs en soufflerie, ce n’est pas le cas. La géométrie des bras jouant sur la réponse verticale, et le coefficient de portance normale n’évoluant pas en cosinus, (cf. Figure (2.10)), font que l’hypothèse d’une réponse en cosinus n’est pas applicable. Il faut alors enregistrer la réponse exacte en soufflerie et en déterminer les coefficients de correction qui seront appliqués par la centrale de navigation. La réponse de l’anémomètre nke à un angle d’attaque vertical ψ est comparée à une réponse en cosinus pur sur la Figure (2.14).

2.3.6 Constante de temps et de distance

L’anémomètre à moulinet peut être considéré comme un système du premier ordre. Ainsi, son comportement dynamique peut être qualifié par une constante de temps τ_a , qui

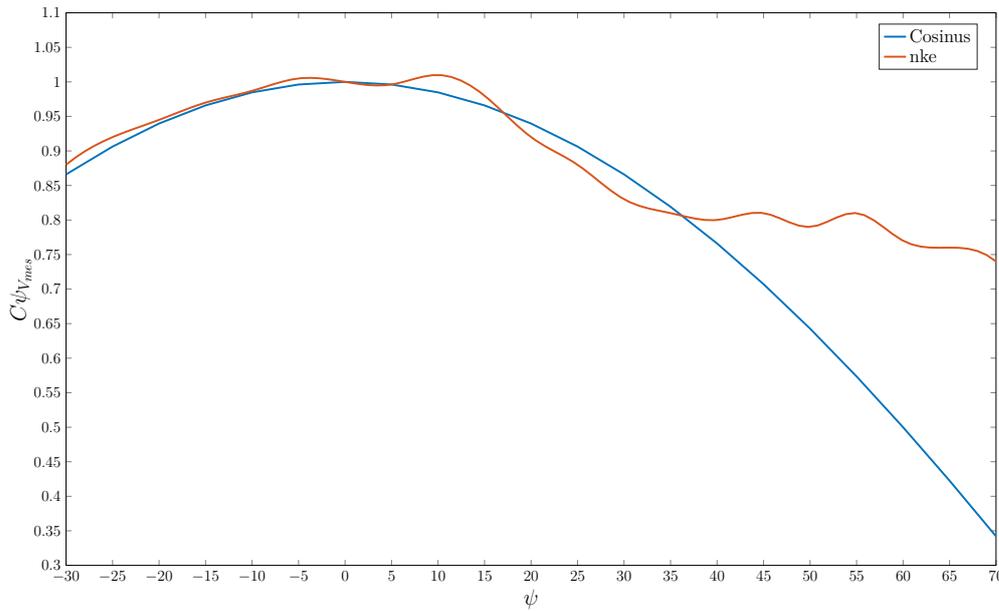


FIGURE 2.14 – Comparaison entre le coefficient de correction idéal, correspondant à une réponse parfaite en cosinus, et le coefficient issu des essais en soufflerie, à appliquer sur la mesure faite par l'anémomètre nke (cf. (B.1a)). Les mesures ne sont pas centrées sur 0, car en pratique, un bateau ne "gîte" pas autant du côté au vent.

caractérise le temps nécessaire pour que le rotor atteigne 63,2% de sa valeur finale.

Pour l'anémomètre nke, ce temps de montée a été caractérisé en soufflerie, avec V en m/s :

$$\tau_a = \frac{1,3}{V} \quad (2.35)$$

De même, les travaux de [MacCready Jr. et Jex, 1964] ont démontré que les anémomètres ne sont pas régis par une constante de temps mais par une constante de distance dc_a . Cette constante correspond à la distance que doit parcourir le vent à travers le rotor pour qu'il atteigne 63,2% de sa vitesse de rotation finale :

$$dc_a = \frac{\tau_a}{V} \quad (2.36)$$

Alors, cette distance n'est plus fonction de la vitesse du vent, elle est donc à privilégier vis-à-vis de τ_a pour caractériser la réponse de l'anémomètre. D'après [Kristensen, 1999] et [Al., 1999], cette distance est proportionnelle à l'inertie du rotor et inversement proportionnelle à la densité de l'air, du ratio C_{tf}/C_{td} et de l'écartement des godets (distance R_r). [Kristensen, 1998] a déterminé que les anémomètres du commerce ont une constante de distance qui varie de 1,7m pour les meilleurs jusqu'à 20m pour certains. Ce sont des valeurs importantes comparativement à la fréquence d'acquisition de la centrale de navigation. Il faut donc s'assurer que les données calculées à partir de cette information ont un sens et que celles

construites à partir d'une association de mesures soient bien issues de capteurs ayant des constantes de temps équivalentes.

2.3.7 Précision de la mesure

Nous venons de voir que le couple aérodynamique est fonction de θ , la position du rotor par rapport à la direction du vent réel. $\mathcal{M}_A(\theta)$, n'étant pas constant sur un tour, $\dot{\theta}$ non plus. Il est donc important de numériser la vitesse de rotation soit à chaque tour complet, soit en moyennant les vitesses mesurées accumulées depuis un tour, à partir de la position actuelle. Ce phénomène de variation de la vitesse de rotation au cours d'un tour complet, bien que le rotor soit soumis à un vent constant, a été mis en évidence par [Wyngaard *et al.*, 1974] lors de la modélisation de la dynamique par série de Fourier à 6 harmoniques, puis validé par [Coppin, 1982] et plus récemment par [Martínez *et al.*, 2016].

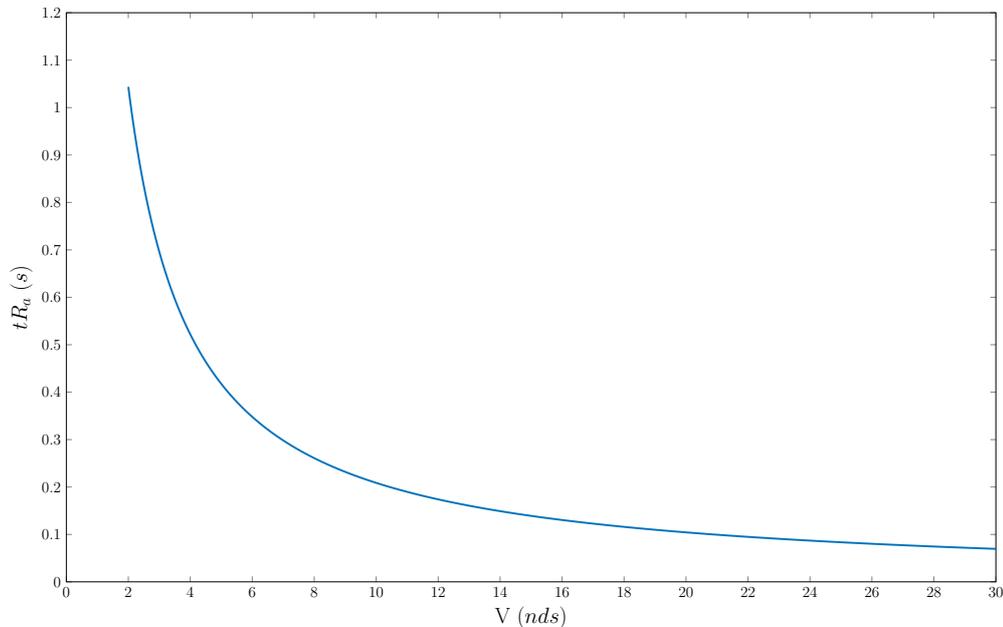


FIGURE 2.15 – Résolution temporelle de l'anémomètre nke en fonction de la vitesse du vent.

Si l'anémomètre fait un tour complet en un temps Δt , alors si une particule du fluide se déplace à une vitesse V en m/s , elle a le temps de parcourir $dR_a = \Delta t \times V$ mètres.

Si on pose $\Delta t = \frac{2\pi}{\dot{\theta}}$ et $\dot{\theta} = \frac{V}{KR_r}$ d'après (2.20), alors $\Delta t = \frac{2\pi KR_r}{V}$ et dR_a peut s'écrire indépendamment de V , uniquement en fonction de la géométrie du moulinet :

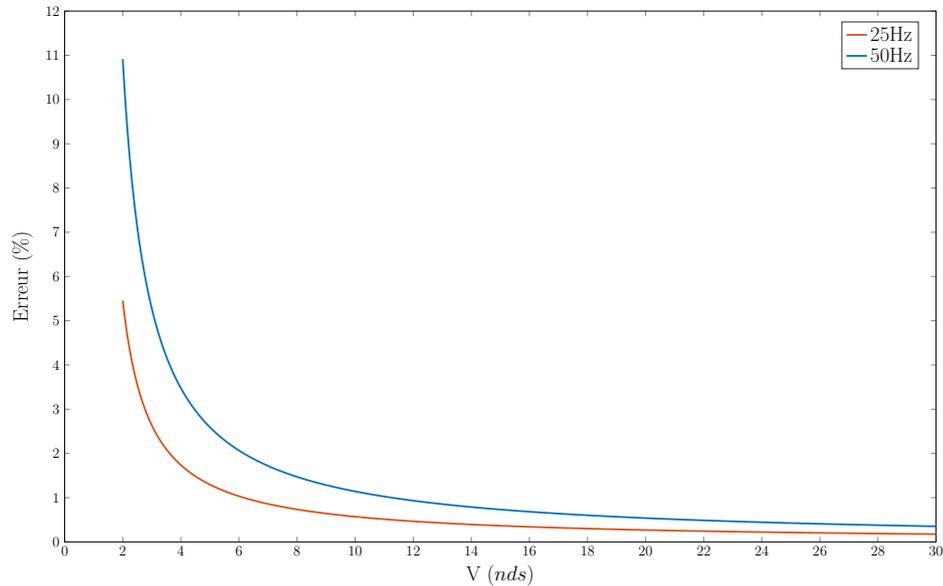
$$dR_a = 2\pi KR_r \quad (2.37)$$

L'équation (2.37) amène le concept de résolution spatiale : la mesure doit s'effectuer sur un tour complet, soit quand le vent a parcouru la distance dR_a .

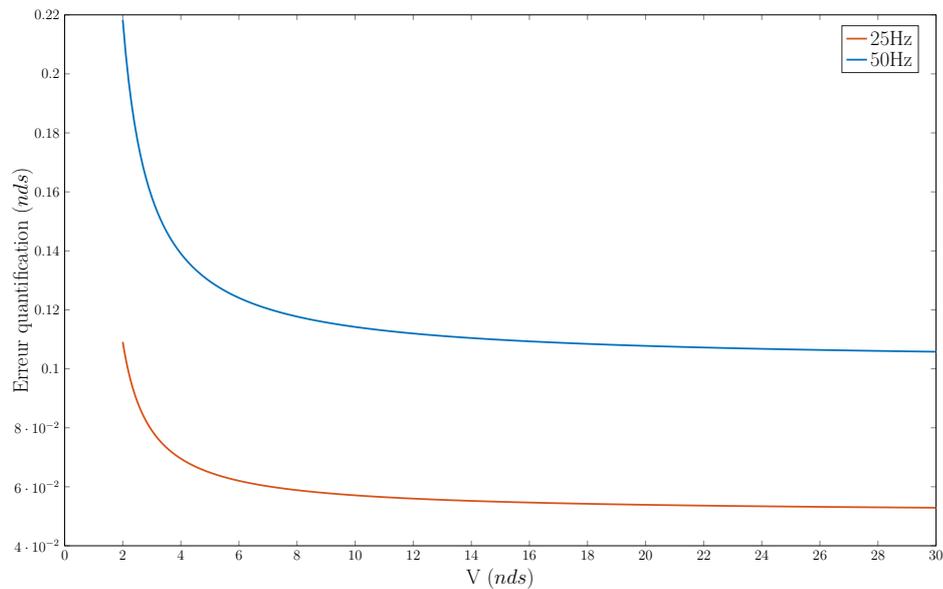
Pour l'anémomètre nke, $dR_a = 2\pi \times 3,42 \times 0,05 = 1,07m$

Si la numérisation s'effectue à chaque tour complet, alors la résolution temporelle est dépendante de la vitesse du vent :

$$tR_a = \frac{V}{dR_a} \quad (2.38)$$



(a)



(b)

FIGURE 2.16 – Erreur sur l'estimation de la vitesse moyenne sur une révolution du rotor, pour une fréquence d'échantillonnage de 25 ou 50Hz sur le moulinet nke. (a) : Erreur en pourcentage sur l'estimation de la vitesse moyenne sur une révolution. (b) : Erreur de quantification en nds en fonction de la vitesse du vent.

Une autre approche est possible si on est capable de numériser plusieurs fois par tour. Le capteur à effet Hall choisi permet de remonter non pas 1 pulse par tour mais 1024. Il est alors théoriquement possible de calculer la vitesse moyenne de révolution $\dot{\theta}$ 1024 fois par tour. Le déphasage de l'information dû au moyennage restera identique. En revanche, le rafraîchissement de l'information sera quant à lui amélioré. Étant donné que la centrale de navigation calcule à $25Hz$, soit toutes les $40ms$, d'après la Figure (2.15), la résolution temporelle n'est jamais aussi faible, et de loin.

La méthode mise en place consiste à estimer $\dot{\theta}$ toutes les $40ms$ à partir du nombre de pulses reçues dans cette fenêtre de temps. L'erreur d'estimation de la rotation effectuée pendant cette fenêtre de temps peut alors valoir jusqu'à $\frac{2\pi}{1024}$, la résolution angulaire de l'ADC. La Figure (2.16a) montre l'erreur de précision pour un échantillonnage à 25 et $50Hz$ et la Figure (2.16b), l'erreur de quantification correspondante. Plus la fréquence d'échantillonnage est élevée, plus la résolution angulaire de l'ADC est grande relativement à la distance angulaire parcourue durant la période d'échantillonnage.

Le moulinet a pour l'instant été étudié en régime établi. Cependant, les perturbations du vent réel, combinées aux mouvements du bateau, font qu'en réalité l'anémomètre est constamment soumis à une perturbation. Il faut donc étudier son comportement en phase d'accélération et de décélération.

2.3.8 Overspeed

Comme les coefficients aérodynamiques des godets ne sont pas identiques sur leurs 2 faces, le rotor ne va pas être autant réactif lorsque le vent baisse que lorsqu'il augmente. Lorsque l'anémomètre est soumis à un vent qui varie en force, il passe alors plus de temps au-dessus de la valeur moyenne qu'en dessous. Ce comportement provoque une sur-estimation de la vitesse moyenne du vent et est communément appelé overspeed. Ce phénomène a été mis en évidence en premier par [Schrenk, 1929], puis étudié plusieurs fois par la suite, ([Wyngaard *et al.*, 1974] [Kaganov et Yaglom, 1976], [Busch et Kristensen, 1976], [Kristensen, 1993], [Kristensen, 1999]). Un modèle simple de la sur-estimation de la vitesse en pourcentage peut être déterminé à partir de la constante de distance et de l'intensité de la turbulence :

$$\epsilon_{overspeed} = I_u^2(1.8dc_a - 1.4) \quad (2.39)$$

Avec :

$\epsilon_{overspeed}$ Le pourcentage d'erreur sur la vitesse moyenne en %.

I_u L'intensité de la turbulence. La méthode pour l'estimer sera détaillée en section 3.2.2.3.

dc_a La constante de distance du rotor.

La Figure (2.17) montre la réponse d'un moulinet à une excitation sinusoïdale, ayant

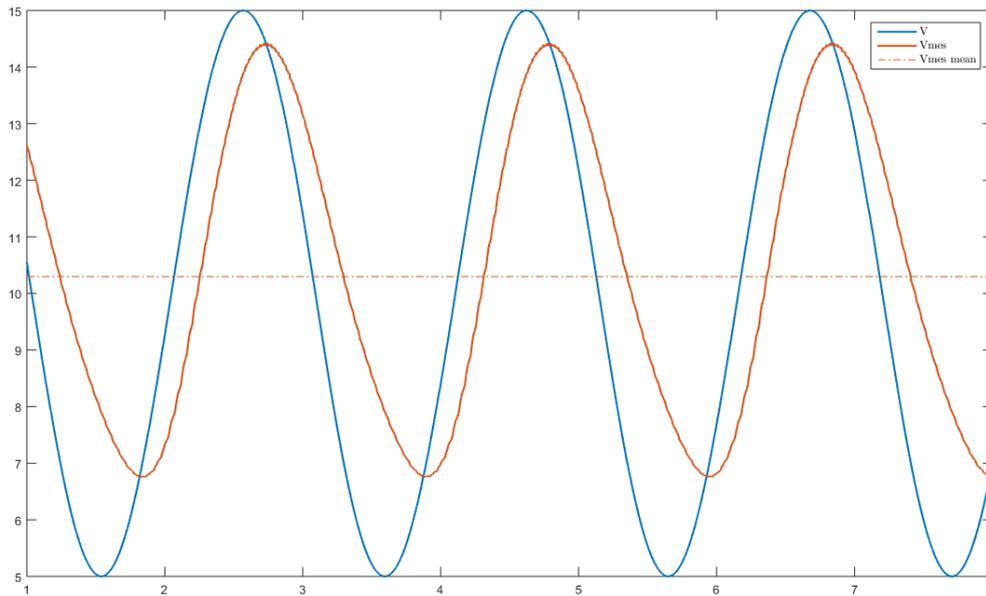


FIGURE 2.17 – Réponse d'un moulinet à une excitation sinusoïdale de valeur moyenne 10nds et d'écart type $2,7\text{nds}$. La valeur moyenne de la réponse est de $10,29\text{nds}$, soit $2,9\%$ de sur-estimation.

pour constante de distance $1,07\text{m}$. L'intensité de la turbulence est égale à $I_u = 2,7/10 = 0,27$ (cf. équation (3.20)). D'après (2.39), la sur-estimation de la vitesse moyenne doit être de :
 $\epsilon_{overspeed} = 0,27^2(1,8 \times 1,07 - 1,4) = 0,03 = 3\%$

Les dissymétries dans la réponse de l'anémomètre peuvent également être causées à cause de l'environnement immédiat et notamment par le support lui-même.

2.3.9 Masquage de la perche

De part la forme de l'aérien, le bras qui le relie au support, bien que déporté au maximum, gêne l'écoulement de l'air lorsqu'il est en amont de l'anémomètre. L'influence du support a été étudié en soufflerie pour les angles portants. Lorsque le support masque la partie concave des godets, le rotor tourne moins vite. À l'inverse, il tourne plus vite quand la section du rotor remontant au vent est masquée. Sur la Figure (2.18) sont représentés les coefficients correcteurs à appliquer sur V_{mes} pour corriger le masquage du support en fonction de β_{app} . Les tests ont été réalisés pour un angle d'incidence vertical ψ nul et une vitesse de veine de 7m/s .

Une des solutions pour éviter ce masquage du support est de venir soutenir l'anémomètre par la base, comme sur la Figure (2.19). Ce type de montage n'est pas compatible avec la technique de numérisation actuellement employée sur l'aérien nke.

En conclusion de cette section consacrée à l'anémomètre, intéressons-nous à la méthode

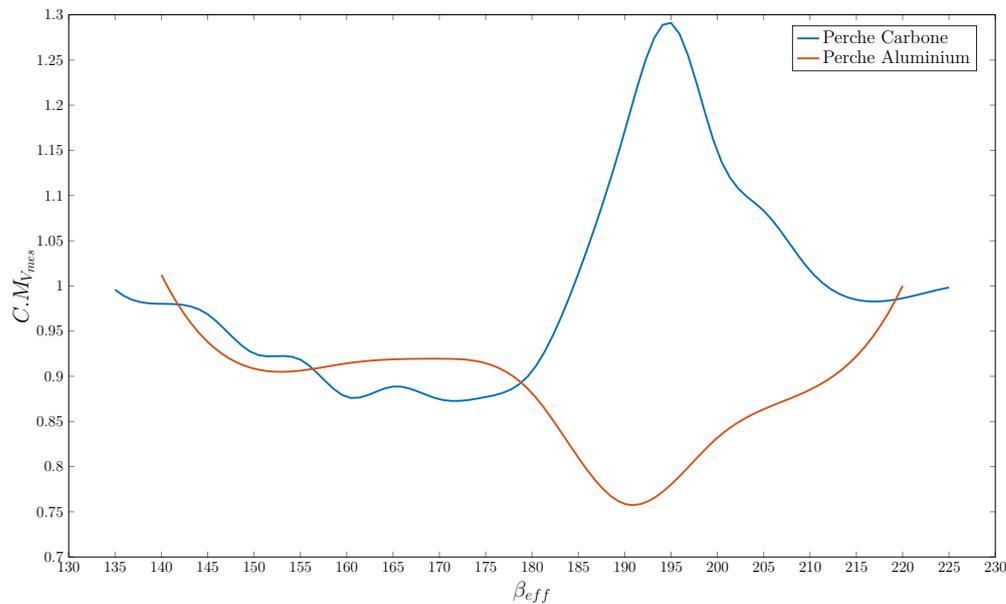


FIGURE 2.18 – Coefficients correctifs à appliquer sur V_{mes} pour corriger le masquage du support en fonction de β_{app} .



FIGURE 2.19 – Aérien de la marque *Omega*^{MD} n'étant pas soumis au phénomène de masquage du support.

utilisée en pratique pour convertir la vitesse de rotation du rotor en une vitesse de vent apparent exprimée en nœuds.

2.3.10 Comportement en régime établi / Calibration

En pratique, le facteur anémométrique K n'est pas utilisé pour faire le lien entre la fréquence de rotation de l'anémomètre fr et la vitesse mesurée V_{mes} . Cette relation est déterminée à l'aide des résultats obtenus en soufflerie. De plus, comme les frottements secs des roulements induisent une vitesse de démarrage non nulle, la fonction n'est plus affine

mais hérite d'un offset B .

Pour corriger les effets de non linéarité aux vitesses élevées, la fonction passe au 2nd ordre. La détermination de ces coefficients est obtenue à l'aide d'un ensemble de mesures effectuées sur plusieurs capteurs en soufflerie. La fréquence de rotation des anémomètres est relevée pour différentes vitesses de références de la veine. Ensuite, les coefficients sont déterminés en appliquant une régression linéaire sur l'ensemble des relevés.

$$V_{mes} = A fr + B + C fr^2 \quad (2.40)$$

Les coefficients obtenus pour l'anémomètre nke sont les suivants : $A = 2,089$ $B = 1,065$ et $C = -0,004$. On remarque que C reste faible et modifie peu le comportement théorique linéaire pour lequel $C = 0$.

La Figure (2.20) montre la linéarité des capteurs testés avec les coefficients sélectionnés. La linéarité est bonne et reste dans la plage d'incertitude de la vitesse de référence de la soufflerie. Cette incertitude est matérialisée sur la figure par les lignes continues encadrant les mesures.

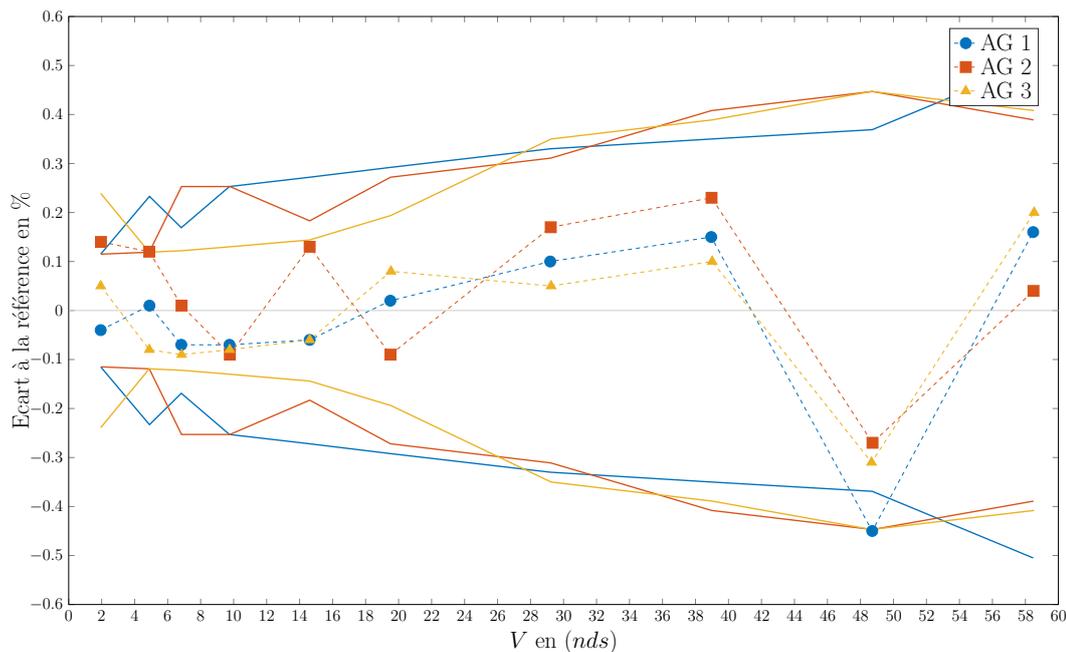


FIGURE 2.20 – Comparaison, en pourcentage, des vitesses obtenues d'après la formule (2.40) avec la vitesse de référence de la veine de la soufflerie. Les lignes pleines matérialisent l'incertitude sur la vitesse de référence de la soufflerie. Correspond à trois capteurs de la gamme HR.

Nous venons de passer en revue les équations caractérisant le moulinet ainsi que les phénomènes à prendre en compte lors de son utilisation. Penchons-nous maintenant sur le second instrument qui lui est associé pour mesurer le vent : la girouette.

2.4 Modélisation de la girouette

Cette section rassemble les travaux effectués pour modéliser le comportement dynamique de la girouette. Cette étape a été réalisée dans l'objectif de réutiliser ces outils mathématiques pour d'une part, améliorer la réponse dynamique du capteur en sélectionnant la forme de pale optimale (section 2.5), et d'autre part réutiliser ces équations lors de l'étape de traitement du signal (section 2.6). L'objectif étant de minimiser simultanément les erreurs et le retard dus au comportement physique de la girouette.

Pour simplifier les notations, le capteur est considéré monté sur un repère fixe, bateau immobile, $\vec{V}_{Ground} = \vec{0}$. Le vent apparent vu depuis le repère bateau est donc égal au vent réel. On notera alors \vec{V} , le vent que l'on cherche à mesurer et \vec{V}_{eff} le vent ressenti/subi par la girouette, cf. Figure (2.21).

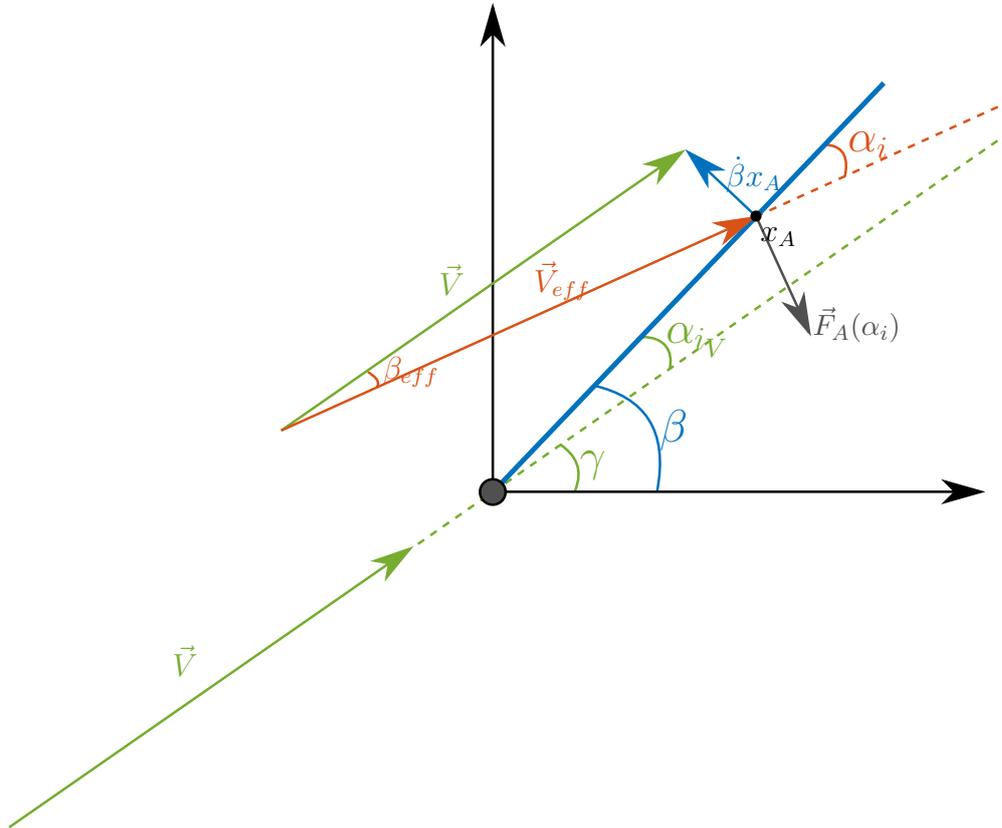


FIGURE 2.21 – Schéma et notations de la dynamique de l'aérien. Le vecteur \vec{V} est le vent dont on cherche à déterminer l'orientation γ par rapport à la référence 0 de la girouette. La pale, représentée par le segment bleu, oscille librement autour de son axe de rotation. Sa position par rapport à la référence est définie par l'angle β . C'est cet angle que l'aérien transmet à la centrale, à l'erreur de numérisation près β_{mess} . x_A représente le point d'application des efforts aérodynamiques et α_i l'angle d'incidence du vent effectif. La différence entre β et γ représente l'erreur d'estimation de la direction du vent, α_{iV} . \vec{F}_A correspond à l'effort de portance aéro, de \vec{V}_{eff} sur la pale.

2.4.1 Équations

Le comportement d'une girouette a été étudié plusieurs fois dans la littérature [Sanuki, 1952], [Pinsker, 1963], [Wieringa, 1967], [Monna, 1978], [Finkelstein, 1981]. Il en ressort qu'il peut être assimilé à un système du second ordre, donc régi par une pulsation propre ω_p et un coefficient d'amortissement ζ (voir Figure (2.22)).

Les équations du système permettent de faire le lien entre les caractéristiques physiques de la girouette, à savoir ses dimensions, son poids, ses roulements, et son comportement dynamique lorsqu'elle est soumise à une perturbation de vent, un changement de direction de \vec{V}_{eff} , [Coneau, 2015].

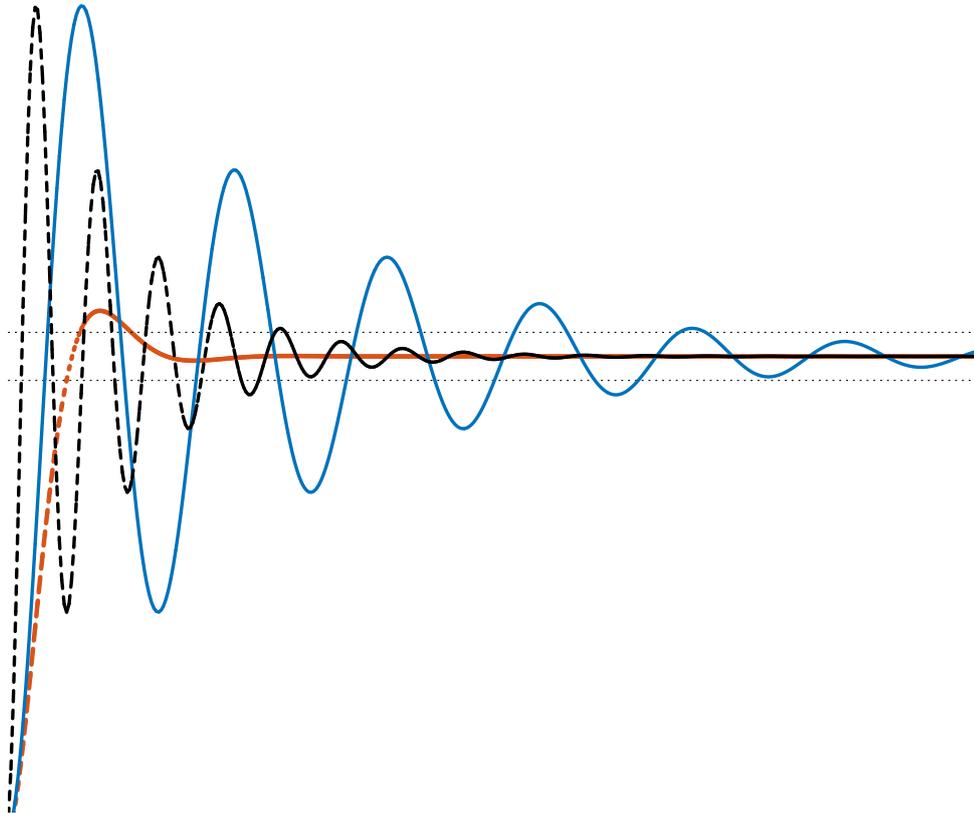


FIGURE 2.22 – Exemple de 3 réactions à un échelon pour un système du 2nd ordre. L'échelon est identique pour les 3 signaux, seul l'un des paramètres du couple $(\omega-\zeta)$ régissant l'équation différentielle, diffère entre chaque signal. Les signaux noir et bleu possèdent le même taux d'amortissement ζ mais la pulsation ω est plus élevée pour le noir. Les signaux bleu et orange possèdent la même pulsation mais ζ est plus élevé pour le signal orange. Les 2 lignes horizontales représentent la bande de 5% d'erreur par rapport à la valeur finale de l'échelon.

2.4.1.1 Établissement de l'équation différentielle

L'équation différentielle modélisant le comportement de la girouette est obtenue en projetant l'équation des moments sur son axe de rotation. Le centre de gravité de l'ensemble de l'aérien étant considéré comme étant sur son axe de rotation, la pesanteur n'entre donc pas en équation. Seuls les efforts de liaison C_r dus au couple de frottement sec des roulements et la force aérodynamique F_A générée par le vent sur l'empennage, entrent en jeu. Cette résultante des efforts aérodynamiques est toujours déterminée d'après le coefficient de portance C_p et de traînée C_t du profil (cf. (1.2)). Cependant, pour cette situation, le coefficient de traînée n'entre pas en équation car la traînée aérodynamique est considérée comme radiale.

Comme pour l'anémomètre, la vitesse de rotation de la pale autour de son axe induit un changement entre l'incidence du vent effectif α_i et l'incidence du vent réel α_{i_V} , cf. Figure (2.21). Si la pale est à l'équilibre dans le flux du vent, soit $\dot{\beta} = 0$ et $\ddot{\beta} = 0$, alors :

$$\gamma = \beta \text{ et } \alpha_i = \alpha_{i_V} = 0$$

Sinon, si la pale est en rotation suite à une perturbation, un changement dans la direction du vent γ , alors :

$$\gamma = \beta - \alpha_{i_V} \quad (2.41)$$

L'angle du vent recherché γ est égal à celui de la pale β , moins l'angle d'incidence de la pale α_{i_V} avec \vec{V} . α_{i_V} ne correspond pas à l'angle d'incidence du vent effectif sur la pale car la vitesse de rotation de celle-ci crée un vent vitesse $\dot{\beta}$ qui fait tourner le vent effectif \vec{V}_{eff} réellement perçu par pale, cf. Figure (2.21). Ce comportement a tendance à augmenter l'amortissement de la pale car β_{eff} est de signe opposé à $\dot{\beta}$.

Alors, l'angle d'incidence du vent effectif peut s'écrire :

$$\alpha_i = \arctan \frac{-(V \sin \alpha_{i_V} + x_A \dot{\beta})}{V \cos \alpha_{i_V}} \quad (2.42)$$

En supposant que les angles d'incidence soient faibles, (2.42) se simplifie en :

$$\alpha_i \simeq - \left(\alpha_{i_V} - \frac{x_A \dot{\beta}}{V} \right) \quad (2.43)$$

et d'après (2.41) :

$$\alpha_i = - \left(\beta - \gamma - \frac{x_A \dot{\beta}}{V} \right) \quad (2.44)$$

Soit C_r le couple de frottement sec des roulement, la projection de l'équation des

moments sur l'axe de rotation de la girouette est de la forme :

$$I \times \ddot{\beta} = \sum \text{moments} = \mathcal{M}_{Aero} - C_r \quad (2.45)$$

Avec le moment aérodynamique :

$$\mathcal{M}_{Aero} = x_A \times \vec{F}_A(\alpha_i) \quad (2.46)$$

D'après (2.48) et l'équation de la portance (1.2), le moment aérodynamique devient :

$$\mathcal{M}_{Aero} = x_A \times \frac{1}{2} \rho S V^2 K \alpha_i \quad (2.47)$$

Avec K le coefficient qui relie l'angle d'incidence au coefficient de portance :

$$C_p = K \times \alpha_i \quad (2.48)$$

Alors, d'après (2.45) et (2.47), en remplaçant α_i d'après (2.44), on obtient l'équation différentielle à coefficients constants suivante :

$$\ddot{\beta} + 2\omega_0 \zeta \dot{\beta} + \omega_0^2 \beta = \omega_0^2 \gamma - \frac{C_r}{I} \quad (2.49)$$

Avec :

$$\omega_0 = V \sqrt{\frac{\rho S x_A K}{2I}} \quad (2.50)$$

$$\zeta = \frac{x_A}{2} \sqrt{\frac{\rho S x_A K}{2I}} \quad (2.51)$$

$$\omega_p = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2.52)$$

ω_0 est la pulsation non amortie du système, exprimée en rad/s . C'est la fréquence à laquelle oscillerait le système si on enlevait l'amortissement ζ .

Le taux d'amortissement ζ est une grandeur sans dimension, caractérisant l'évolution et la décroissance au cours du temps des oscillations d'un système physique.

ω_p est la pulsation propre ou amortie : c'est la pseudo-période à laquelle la girouette oscille réellement. D'après ces équations, la pulsation propre est proportionnelle à la vitesse du vent apparent V , et l'amortissement est constant pour un design donné.

Intéressons-nous maintenant à définir ω_0 et ζ en fonction des caractéristiques dimensionnelles de la pale.

2.4.1.2 Modélisation

La modélisation de la girouette est découpée en 3 éléments physiques : les 2 premiers qui concernent le contrepoids et la tête rotative, sont considérés comme n'ayant pas d'influence sur le comportement aérodynamique. Ils ne rentrent en compte que dans la caractérisation du moment d'inertie de la girouette I . Le 3^{ème} est la pale, dont le design influe sur le moment aérodynamique \mathcal{M}_{Aero} et l'inertie de l'ensemble.

2.4.1.2.1 Forme de la pale Il a été décidé de spécifier la géométrie de la pale à l'aide des 5 dimensions de la Figure (2.23). Ainsi, en faisant varier individuellement ces paramètres, il est possible d'obtenir l'ensemble des dessins de la théorie des ailes delta et des profils minces.

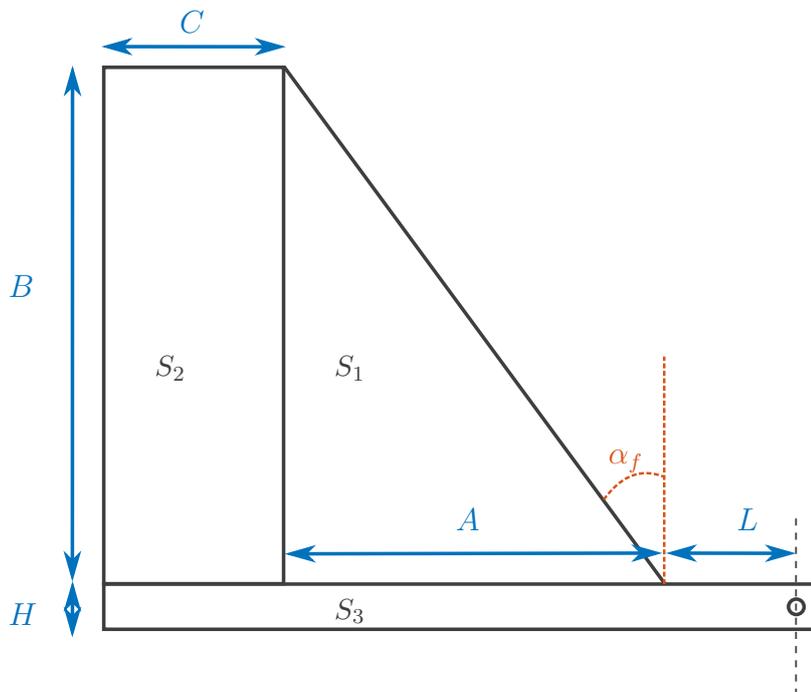


FIGURE 2.23 – Dimensions caractérisant la forme de la pale.

2.4.1.2.2 Théorie des profils minces Cette théorie permet de déterminer la portance d'un profil à condition :

- Que le profil soit mince : son épaisseur doit être inférieure à 10% de la longueur de corde et de faible cambrure.
 - Que l'écoulement soit bidimensionnel, ce qui implique un profil d'allongement infini.
- Lorsque qu'elle est applicable, cela implique que :

- Le centre de poussée vélique x_A est situé au quart de corde.
- La pente de portance est de 2π par radian. Soit pour l'équation (2.48) : $K = 2\pi$.

Théorisée au début du 20^{ème} siècle par Prandtl et Munk [Prandtl, 1920], elle est particulièrement adaptée à la modélisation de la portance sur nos pales qui sont faites d'une plaque plane d'une épaisseur e comprise entre 0,5 et 1mm. Cependant, nos pales n'ont pas un allongement λ infini. La relation $C_p = 2\pi\alpha_i$ ne peut donc pas être directement appliquée [Thierry, 2008]. Il faut donc trouver une alternative à cette relation pour définir le coefficient de portance.

2.4.1.2.3 Coefficient de portance Comme l'allongement des pales n'est pas infini, le coefficient de proportionnalité de portance K ne peut pas être considéré comme étant égal à 2π .

Nous avons cherché dans la littérature d'autres équations valables pour les faibles allongements. [Ebert et Wood, 1995] proposent d'utiliser l'expression de la vitesse induite, déterminée d'après les hypothèses de [Plotkin et Katz, 1991] et la relie à la portance d'après les équations de [Desjardins *et al.*, 1986]. On obtient alors la relation suivante pour l'expression du moment aérodynamique :

$$\mathcal{M}_{Aero} = \int_0^{c_0} \frac{dF_A}{dx} (x - L) dx \quad (2.53)$$

$$\mathcal{M}_{Aero} = \beta \times \frac{1}{16} \pi \rho V^2 B \left(L - \frac{2}{3} c_0 \right) + \dot{\beta} \times \frac{1}{16} \pi \rho V B (2c_0 L - c_0^2 - L^2) + \ddot{\beta} \times \frac{1}{16} \pi \rho B \left(\frac{1}{2} c_0^2 L - \frac{1}{5} c_0^3 - \frac{1}{3} c_0 L^2 \right) \quad (2.54)$$

Avec $c_0 = A + C$

L'équation différentielle (2.49) peut être déterminée avec les mêmes paramètres. Seul K va être pondéré par l'allongement pour devenir :

$$K_\lambda = \frac{2\pi}{1 + \frac{2}{\lambda}} \quad (2.55)$$

Et l'allongement λ défini d'après l'envergure $E = B + H$ et la surface S :

$$\lambda = \frac{E^2}{S} \quad (2.56)$$

[Polhamus, 1968] a affiné cette méthode en intégrant la portance générée par les tourbillons marginaux pour obtenir une équation de la forme :

$$C_p = K_p \sin \alpha_i \cos \alpha_i^2 + K_v \sin \alpha_i^2 \cos \alpha_i \quad (2.57)$$

Cependant, nos tests montrent des résultats très proches sur l'estimation de C_p . Ainsi, compte tenu de la précision du modèle dans sa globalité, la relation (2.55), plus simple, est préférée.

2.4.1.2.4 Calcul de la surface et du centre aérodynamique La surface aérodynamique de la pale est obtenue d'après les distances A, B, C, L & H et la corde moyenne aérodynamique est définie d'après $\frac{1}{S} \int_0^E c(y) dy$, avec $c(y)$ la corde à la position y . Cependant, les résultats des tests de validation du modèle montrent que la deuxième solution, consistant à placer le centre des efforts aérodynamiques x_A au centre de surface et non pas au quart de corde, est plus réaliste.

2.4.1.2.5 Calcul du moment d'inertie Afin de déterminer les deux coefficients régissant la dynamique de la pale (équations (2.50) & (2.51)), il reste à spécifier le moment d'inertie de l'ensemble :

$$I = I_p + I_t + I_{cp} \quad (2.58)$$

L'inertie I_t de la tête rotative en aluminium qui maintient l'ensemble est obtenue d'après les plans numériques à l'aide d'un logiciel de CAO. C'est une pièce mécanique qui ne va a priori pas être re-dessinée. $I_t = 0,27 \times 10^{-6} kg.m^2$.

L'inertie I_{cp} du contrepoids est dans un premier temps calculée d'après les deux hypothèses suivantes :

- La girouette est équilibrée,
- La masse du contrepoids m_{cp} est deux fois supérieure à celle de la pale m_p .

L'optimisation des performances en jouant sur le contrepoids sera détaillée dans la section 2.5.4.

Le moment d'inertie d'un objet non ponctuel, excentré de l'axe de rotation, se définit d'après le théorème de transport de Huygens par : *Le moment d'inertie d'une surface par rapport à un axe quelconque est égal au moment d'inertie de cette surface par un axe parallèle passant par son centre de gravité, augmenté du produit de la valeur de la surface par le carré de la distance des axes.*

Soit Iq le moment quadratique de l'objet, son moment d'inertie par rapport à l'axe de rotation de la girouette et obtenu d'après : $I = Iq + m \times x_{CG}^2$, avec x_{CG} la distance entre son centre de gravité et l'axe de rotation.

Le moment quadratique du contrepoids est défini d'après celui d'un cylindre : $Iq_{cp} = m_{cp} \frac{L_{cp}}{12}$, avec L_{cp} la longueur du cylindre. Alors, le moment d'inertie du contrepoids est obtenu d'après :

$$I_{cp} = Iq_{cp} + m_{cp} \times r_{cp}^2 = m_{cp} \left(\frac{L_{cp}^2}{12} + r_{cp}^2 \right) \quad (2.59)$$

Sur le même principe, le moment d'inertie de la pale est obtenu en décomposant la surface totale de la pale en 3, cf. Figure (2.23).

Masse surfacique : mS est le produit de la densité de la pale ρ_p par son épaisseur e . Les pales sont découpées dans des plaques de fibres de verre epoxy ou bien de carbone : $\rho_{verre} = 2000kg/m^3$ et $\rho_{carbone} = 1500kg/m^3$. Alors, la masse des surfaces correspondantes est obtenue d'après le produit suivant :

$$m1 = mS \times S_1 \quad (2.60)$$

Centres de gravité : les équations reliant les centres de gravité des sous-ensembles S_1, S_2, S_3 avec celui de la pale sont obtenus d'après les équations :

$$x_{CG.1} = \frac{2}{3}A + L \quad (2.61)$$

$$x_{CG.2} = \frac{1}{2}C + A + L \quad (2.62)$$

$$x_{CG.3} = \frac{1}{2}(C + A + L) \quad (2.63)$$

$$x_{CG.P} = \frac{x_{CG.1}m1 + x_{CG.2}m2 + x_{CG.3}m3}{m1 + m2 + m3} \quad (2.64)$$

Moments quadratiques :

$$Iq.1 = m1 \frac{BA^3}{36} \quad (2.65)$$

$$Iq.2 = m2 \frac{BC^3}{12} \quad (2.66)$$

$$Iq.3 = m3 \frac{H(L + A + C)^3}{12} \quad (2.67)$$

Moment d'inertie de la pale : alors, le moment d'inertie de la pale peut être relié aux dimensions A, B, C, L & H d'après :

$$I_p = (Iq.1 + m1 \times x_{CG.1}^2) + (Iq.2 + m2 \times x_{CG.2}^2) + (Iq.3 + m3 \times x_{CG.3}^2) \quad (2.68)$$

2.4.2 Validation Expérimentale

Afin de vérifier que les équations décrivent avec suffisamment de précision le comportement dynamique de ce type de girouette, une série de tests de validation a été effectuée en soufflerie. La soufflerie utilisée pour ces tests est l'une de celles de l'École Centrale de

Nantes. C'est une soufflerie à retour avec une veine fermée de $1m$ de long pour une section de $50 \times 50cm$. Sa plage de vitesse utile est de $[0; 40m/s]$ pour un taux de turbulence I_u de 0.1%.

2.4.2.1 Pales étudiées

Plusieurs formes de pales ont été dessinées puis découpées dans le même matériau utilisé habituellement pour les pales nke. Les formes ont été définies en sélectionnant les valeurs des dimensions A , B , C & L de la Figure (2.23) pour que :

- Les pales soient divisées en 3 groupes d'allongement similaire : le groupe 1 a un allongement intermédiaire, le 2 a un fort allongement et le 3 a un faible allongement.
- La somme des surfaces S_1 & S_2 soit égale à $28cm^2$.
- Des 3 pales de référence de chaque groupe, soient dérivées 3 pales a,b & c.
- Pour ces pales dérivées, la distance L est calculée afin que l'inertie reste proche de la pale d'origine.
- Sur certaines pales, plusieurs trous de fixation permettent de faire varier la distance L et donc l'inertie et x_A .

Les pales 1a, 2a et 3a sont obtenues à partir des pales d'origine, en coupant l'aile au tiers de sa hauteur. Dans cette configuration, ni la surface ni l'allongement ne sont conservés.

Les pales 1b, 2b et 3b sont obtenues à partir des pales 1a, 2a et 3a, en rajoutant de la surface au niveau du bord de fuite, de manière à ce que les pales 1b, 2b et 3b, conservent la même surface que les pales de référence.

Les dimensions des pales 1c, 2c et 3c sont définies de telle sorte qu'elles aient le même allongement et la même envergure que les pales d'origine, tout en conservant une forme similaire à celles des pales a et b (triangle coupé à la "hauteur" 2/3).

La liste des pales est visible sur la Figure (2.24). Les pales déjà utilisées chez nke, ainsi que quelques unes d'autres fabricants, sont également incluses dans le processus de test.

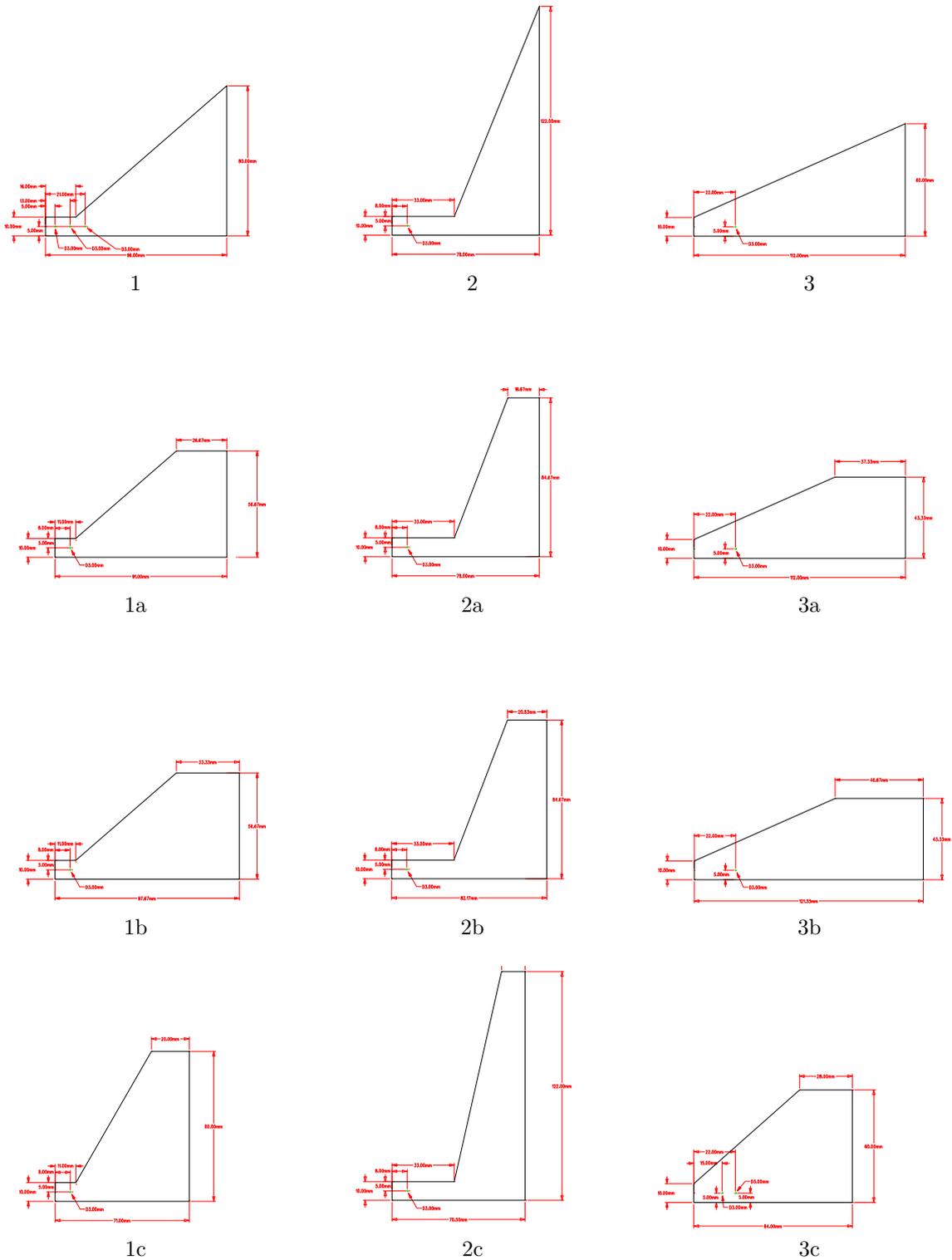


FIGURE 2.24 – Designs des pales découpées pour la validation du modèle. Les ratios sont respectés.

2.4.2.2 Essais réalisés

Méthodologie Les essais sont réalisés de manière à reproduire la réponse à un échelon (comme exposé avec la Figure (2.22)), soit un changement instantané de la direction du vent. Les pales sont immobilisées à un certain angle d'incidence α_{iV} par rapport à la direction du vent (l'axe de la veine), puis lâchées. L'oscillation est alors enregistrée à une fréquence de $100Hz$. La procédure est réalisée à plusieurs reprises en faisant varier légèrement l'angle d'incidence de départ et pour 2 vitesses de veine : 5 et $10m/s$. Ces vitesses ont été sélectionnées car elles correspondent respectivement à 9,7 et 19,4nds, soit la plage de vent apparent couramment subie par l'aérien, cf. section 2.5.2.3.

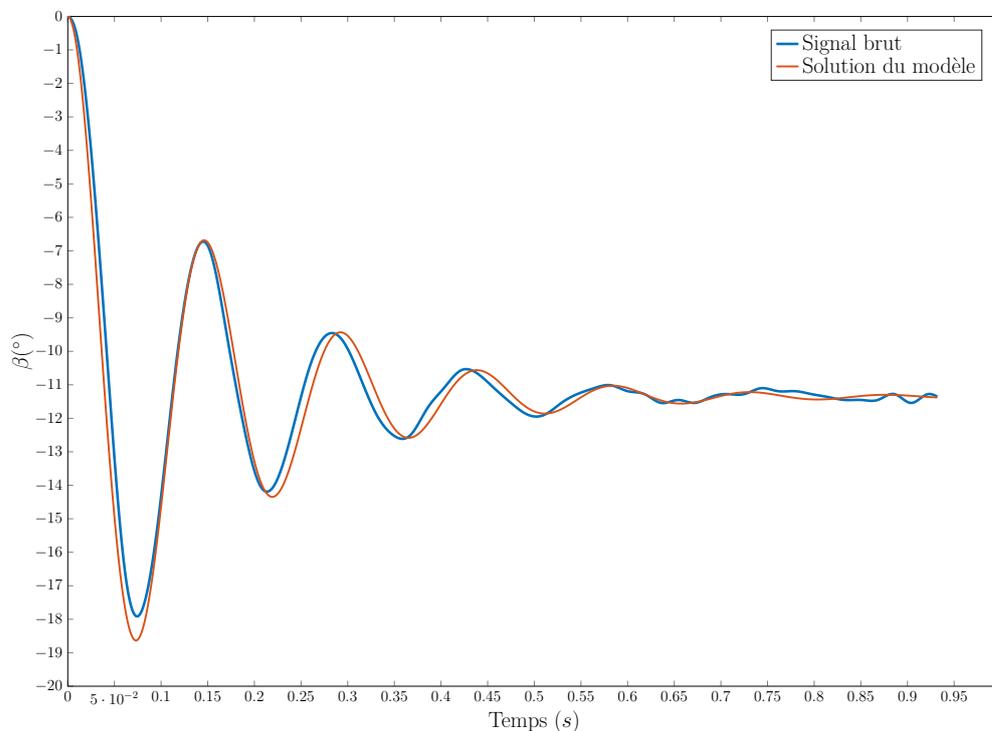


FIGURE 2.25 – Comparaison du signal enregistré de la réponse à un échelon d'environ 12° de la pale 2b pour un vent de $10m/s$, avec la solution équivalente proposée par le modèle mathématique. $\zeta_{expe} = 0,159$ $\omega_{expe} = 44,3$, $\zeta_{num} = 0,134$ $\omega_{num} = 43,4$.

Résultats La Figure (2.25) représente le travail effectué pour chacun des designs testés. L'enregistrement de la réponse à un échelon est isolé, dans ce cas c'est un échelon de 12° pour la pale 2b. Puis, à partir de ce signal expérimental, sont retrouvés les paramètres ζ et ω , à l'aide de la valeur du premier dépassement pour ζ et de la transformée de Fourier du signal pour ω . Ces deux valeurs sont ensuite ajustées par la méthode des moindres carrés, de façon à ce que la simulation de l'échelon avec les paramètres estimés soit la plus proche du

signal enregistré. Ces paramètres ζ_{expe} et ω_{expe} sont alors considérés comme étant les vraies valeurs définissant la réponse en 2nd ordre du design associé. Ils sont alors comparés à ζ_{num} et ω_{num} , obtenus d'après la méthode décrite dans la section suivante. Sur la Figure (2.25), est dessinée, en plus de la réponse réelle de la pale, la simulation du même échelon avec, comme paramètres de simulation, les coefficients issus du modèle développé, ζ_{num} et ω_{num} .

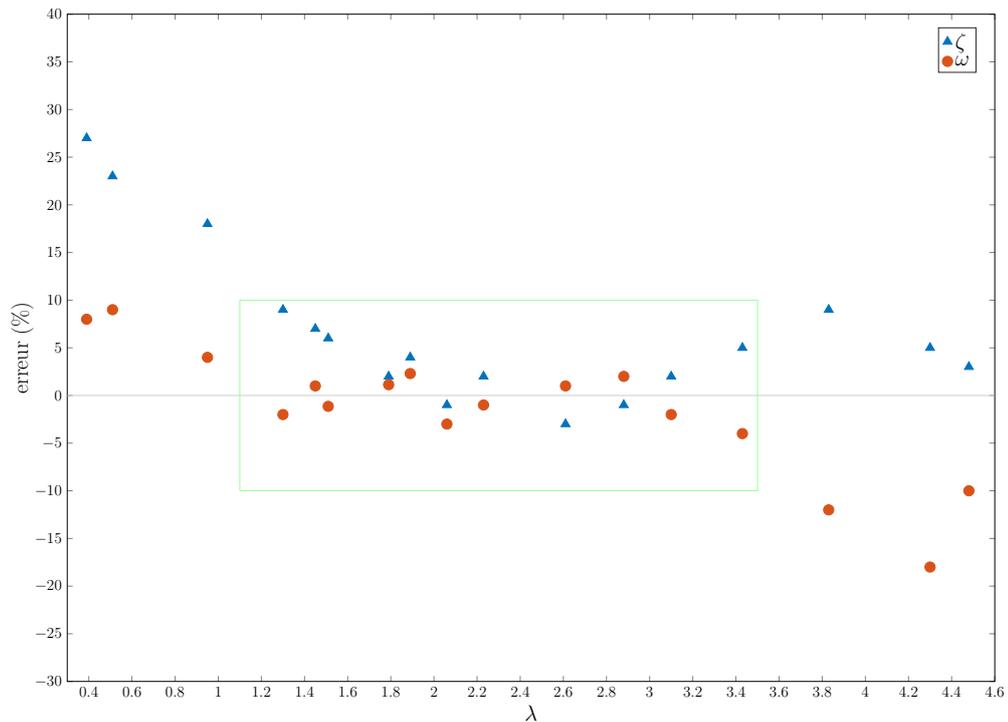


FIGURE 2.26 – Erreurs en pourcentage entre les valeurs de pulsation ω et de d'amortissement ζ estimées par le modèle et les résultats obtenus lors des tests en soufflerie. Les données sont classées en fonction de l'allongement du design considéré. La zone verte correspond à l'amplitude d'allongement λ pour laquelle le modèle est considéré fiable (erreur inférieure à 10%).

Le récapitulatif des résultats obtenus lors de ces tests est présenté sur la Figure (2.26). Le critère de précision est l'écart en pourcentage entre les valeurs expérimentales, représentant la référence, et les valeurs obtenues avec le modèle numérique. Les résultats sont classés en fonction de l'allongement du design considéré, ce qui permet de visualiser pour quels allongements le modèle est plus ou moins fiable.

On remarque que pour les allongements extrêmes (inférieurs à 1 ou supérieurs à 3,5), l'erreur de modélisation sur l'amortissement et sur la pulsation est significative. Par contre, concernant la plage d'allongement $]1; 3, 5]$, l'erreur de modélisation est comprise entre $[-3; 2, 3\%]$ pour la pulsation et $[-3; 9\%]$ pour l'amortissement. Compte tenu de l'utilisation que l'on souhaite faire de ces résultats, application qui sera détaillée dans la section suivante, ce degré de précision est considéré comme satisfaisant.

Conclusion

Nous avons maintenant un modèle qui nous permet de faire le lien entre le design de la pale, à savoir ses dimensions et les caractéristiques du matériau qui la compose, et les coefficients ω et ζ qui suffisent à spécifier son comportement. Les résultats de validation nous ont permis de valider ce modèle pour les pales dont l'allongement est compris entre 1 et 3,5. Nous allons maintenant voir comment ces travaux vont nous être utiles pour sélectionner le design qui offrira le comportement optimal.

2.5 Optimisation de la forme de pale

Cette section est consacrée à la méthode mise en place pour spécifier le design optimal de la pale en s'aidant du modèle mathématique exposé dans la section précédente.

2.5.1 Introduction

Jusqu'à présent, les designs des pales des girouettes chez nke et dans le monde de la voile en général, étaient sélectionnés de manière empirique et arbitraire (voir l'évolution du design nke sur la Figure (2.7)). Nous avons vu dans la section 2.2 qu'étant donné que la girouette possède des parties mobiles, le signal fourni est entaché d'un retard imputable au comportement dynamique des pièces mobiles. Nous venons également de voir dans la section précédente que ce comportement dynamique peut être assimilé à un 2nd ordre et que son comportement n'est pas identique suivant les designs testés, cf. Figure (2.22). D'après ces résultats, il est judicieux de sélectionner le design qui fournira la réponse la plus adaptée à l'utilisation finale. À savoir dans notre cas, la réponse qui possèdera le moins de retard mécanique, et le meilleur temps de réponse.

Nous allons maintenant travailler à obtenir, ou faire tendre les paramètres ω et ζ , vers les valeurs que l'on considère comme étant optimales. La méthode que nous allons employer fait partie du domaine de la recherche opérationnelle. Ces travaux ont été mis en application via l'utilisation des outils disponibles au laboratoire [Cerqueus *et al.*, 2016]. Cette méthode d'optimisation repose sur un solveur numérique. Son rôle est de fournir la solution optimale à la question posée à partir de données d'entrée modélisant le comportement de l'élément à optimiser. La partie recherche opérationnelle n'étant pas le sujet de cette thèse, la description que nous en faisons ici reste de haut niveau. La formulation mathématique du problème étant non-linéaire, sa résolution s'est effectuée à l'aide de deux solveurs, spécialisés pour ce type de contraintes : [Localsolver, 2015] qui utilise une approche heuristique et [Ibex, 2015] qui est un solveur exact.

Pour notre application, le rôle du solveur est de fournir les dimensions optimales de la pale (A , B , C & L , cf. Figure (2.23)), en fonction des critères de performance spécifiés.

2.5.2 Données d'entrée

Pour fonctionner, le solveur a besoin d'équations modélisant le problème à optimiser et de connaître l'environnement dans lequel le design produit sera utilisé. Enfin, il faut spécifier à l'outil quelles sont les contraintes physiques de conception.

2.5.2.1 Équations à optimiser

Ce sont les équations (2.50) & (2.51), celles qui définissent les coefficients de l'équation différentielle. Celles qui lient ω et ζ aux caractéristiques physiques de la pale.

L'objectif est d'obtenir le design qui possède le meilleur temps de réponse. En effet, dans un mode d'utilisation classique du signal, la donnée est utilisée à l'état brut, avec éventuellement un filtre moyennneur. Alors, plus Tr sera faible, meilleure sera la réactivité du système. Cette réactivité peut être caractérisée en fonction de ω et ζ à l'aide de la relation suivante lorsque $\zeta < 0.7$:

$$Tr_{5\%} = \frac{\ln 0.05}{\omega \times \zeta} \quad (2.69)$$

Pour une pulsation donnée, le temps de réponse décroît lorsque le coefficient d'amortissement augmente, jusqu'à sa valeur optimale qui est de $\zeta = 0,7$ pour un 2nd ordre.

Minimiser le temps de réponse est donc l'objectif lorsque l'on s'intéresse au signal dans le domaine temporel. Si l'on souhaite travailler sur la réponse dans le domaine fréquentiel, il faut se pencher sur ω qui définit la pulsation de la réponse.

Réponse en fréquence La fonction de transfert d'un second ordre peut être définie d'après ω et ζ de la sorte :

$$H(s) = \frac{\omega_p^2}{s^2 + 2\zeta\omega_p s + \omega_p^2} \quad (2.70)$$

Sachant que les spécifications de la centrale de navigation sont de mesurer et d'agir sur la commande de barre à $25Hz$ (ce qui n'est pas forcément réaliste par rapport à la fréquence des perturbations du vent réel, mais qui le devient lorsque l'on rajoute les mouvements du bateau), et que la fonction de transfert (2.70) est de la forme d'un passe-bas, il faut que sa fréquence de coupure soit supérieure à $25Hz$, ou encore $157rad/s$, pour que la réponse mécanique ne soit pas l'élément limitant de la chaîne de mesure.

La Figure (2.27) représente la réponse en fréquence de la pale originale nke et de celle du concurrent B&G pour une vitesse de vent de $4,5nds$.

La fréquence de cassure pour la pale B&G est de $0,9Hz$ et de $2,1Hz$ pour la pale nke, ce qui est très loin des $25Hz$ de la centrale : le capteur n'est pas capable de retransmettre les variations du vent qui sont plus rapides que ces fréquences.

On remarque sur la Figure (2.27) que la réponse est amplifiée à proximité de la pulsation propre. Ce comportement est spécifique aux systèmes du 2nd ordre et est d'autant plus marqué que l'amortissement est faible. Il est centré sur la pulsation de pseudo-résonance ω_r :

$$\omega_r = \omega_0 \sqrt{1 - 2\zeta^2} \quad (2.71)$$

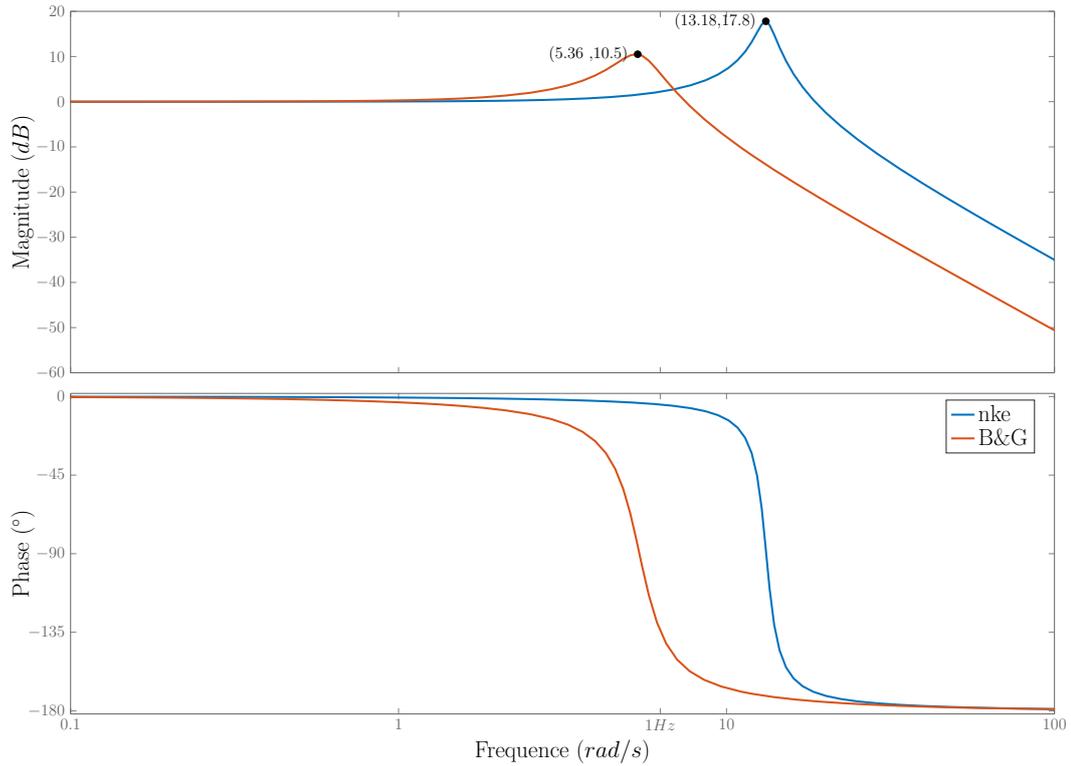


FIGURE 2.27 – Diagramme de Bode de la girouette nke et de l'équivalent chez la marque B&G. Cette figure est valable pour une vitesse de vent de $2,5\text{m/s}$ soit $4,5\text{nds}$.

L'amplitude de cette résonance est fonction du coefficient d'amortissement :

$$G(\omega_r) = \frac{1}{2\zeta\sqrt{1-2\zeta^2}} \quad (2.72)$$

$G(\omega_r)$ est aussi appelé coefficient de surtension ou de qualité noté Q . Pour l'exemple de la Figure (2.27), $Q = 7,72$ pour la pale nke et $3,35$ pour la pale B&G. Cela veut dire que bien que la pale nke soit capable de capter des variations plus rapides, pour la fréquence $\omega_r = 2,1\text{Hz}$, les perturbations seront amplifiées $7\times$.

Alors, pour minimiser ce comportement, il faut d'après l'équation (2.72) maximiser l'amortissement ζ . Ce qui est compatible avec l'objectif de minimisation du temps de réponse, tant que ζ ne dépasse pas $0,7$. Ce qui est physiquement irréalisable sans l'ajout d'un mécanisme d'amortissement mécanique [Wieringa, 1967].

Pour satisfaire le traitement du signal Nous verrons dans la section suivante que pour optimiser le traitement du signal, il faut maximiser la pulsation ω dans l'objectif de réduire la période d'oscillation de la pale. L'objectif optimal étant de faire en sorte qu'une demi-période d'oscillation corresponde au temps de cadencement de la centrale. Soit : (sachant que 25Hz

est équivalent à $157,08rad/s$)

$$\frac{1}{\omega_p} = \frac{1}{157,08} \quad (2.73)$$

Soit :

$$\omega_p = \frac{157,08}{2} = 78,54rad/s \quad (2.74)$$

Résumé : Les objectifs d'optimisation sont :

- minimiser $Tr_{5\%}$ (maximiser ζ & ω).
- maximiser ω , idéalement $\omega_p = 78,54rad/s$, pour satisfaire le traitement du signal.
- maximiser ζ , pour minimiser la résonance.

Après avoir passé en revue la liste des objectifs imposés au solveur, il faut dresser celle des contraintes.

2.5.2.2 Contraintes de design et performance

Sont spécifiées au solveur la densité du matériau et l'épaisseur de la pale, ainsi que la hauteur de la languette : $H = 10mm$. Les variables disponibles pour satisfaire les objectifs sont alors les distances A , B , C & L . Ce sont celles que le solveur va ajuster, avec comme critère de design à respecter la liste résumée dans le Tableau (2.2) :

Contrainte N°	Variable	Plage
1	A	$A < 300$
2	B	$B < 150$
3	C	$10 < C < 150$ & $C > 0,15B$
4	L	$L < 100$
5	S	$S > 25cm^2$
6	α_f	$\alpha_f > 20^\circ$
7	λ	$1 < \lambda < 3,5$

TABLE 2.2 – Contraintes que le solveur doit respecter.

La contrainte N°7 sur l'allongement sert à respecter le domaine d'application du modèle mathématique, cf. Figure (2.26). La contrainte N°6 sur l'angle de flèche est mise en place pour s'assurer que le design respecte celui des ailes delta. La contrainte N°5 sur la surface permet d'éviter que le solveur produise un design trop compact. Les contraintes N°1 à 4 sont de l'ordre mécanique, pour éviter que la pale ne se brise.

Afin d'améliorer la performance de la pale à forte incidence, le dessin doit être de type aile gothique. C'est pour cette raison que sur la contrainte N°3, la distance C doit être au moins égale à 15% de la hauteur. On obtient alors une aile delta tronquée. La pale est ensuite découpée avec une courbure parabolique à son extrémité, ce qui a pour effet de favoriser la portance tourbillonnaire pour les grands angles d'incidence, (amélioration de l'ordre de 15% [GAD-EL-HAK et BLACKWELDER, 1985]).

En terme de traitement du signal, pour respecter le théorème de Shannon, sachant que la numérisation s'effectue à $50Hz$, il ne faut pas que la pale oscille à plus de $\frac{50Hz}{2} = 25Hz$. ω_p devra donc rester inférieur à $157rad/s$.

Par des retours d'expérience utilisateur, nous nous sommes rendu compte que les casses des bras et des supports de l'aérien en aluminium n'étaient pas dues à des chocs mais parce que pour une certaine vitesse de vent, l'aérien rentre en résonance avec le support, et provoque sa casse. Des tests ont permis de déterminer que cette pulsation de résonance est de $98rad/s$. Pour s'assurer que le design spécifié par le solveur n'entre pas dans cette condition de casse mécanique, il est imposé que la pulsation reste inférieure à $90rad/s$.

On obtient alors le tableau (2.3) qui récapitule les objectifs d'optimisation :

Objectif N°	Variable	Critère	Contrainte
1	$Tr_{5\%}$	minimiser	
2	ω	faire tendre vers $78,54rad/s$	$\omega_p < \omega_{p_{max}}(90rad/s)$
3	ζ	maximiser	$\zeta < 0,7$

TABLE 2.3 – Objectifs que le solveur doit chercher à atteindre.

Concernant l'objectif N°2, étant donné que le critère numérique faisant respecter le théorème de Shannon, est supérieur à celui permettant d'éviter la casse mécanique par résonance, c'est ce dernier qui est limitant. L'objectif N°3 demande à ce que l'amortissement reste inférieur à 0.7. En pratique, la densité des matériaux à notre disposition ne permet pas d'atteindre ce critère.

Nous venons de voir les effets de la mécanique sur l'optimisation, il nous reste maintenant à étudier l'impact du vent.

2.5.2.3 Distribution de la vitesse du vent réel

Nous avons vu avec l'équation (2.50) que la pulsation est proportionnelle à la vitesse du vent. Ceci implique de spécifier pour quelle plage de vent la girouette va être utilisée. La solution la plus simple étant de définir une vitesse minimale et maximale. Cependant, il faut

se rappeler que le vent qui agit sur le capteur n'est pas le vent réel, c'est le vent apparent qui dépend aussi du vecteur déplacement du bateau. Il est alors difficile de spécifier sans outil quelle sera la plage de vitesse que le capteur subira réellement.

De plus, si il peut arriver que le bateau navigue dans du vent très fort, ce n'est en général que très rarement le cas. D'une part parce que ces conditions météorologiques sont assez rares, et d'autre part car quand elles se présentent, les navigateurs préfèrent les contourner si possible. L'idée est alors de spécifier au solveur non pas une plage de vent homogène mais une distribution de vent, représentative de la répartition statistique des vitesses de vent que le capteur est susceptible de rencontrer lors de l'utilisation spécifiée.

Ainsi, le solveur pourra optimiser la forme de la pale pour son utilisation effective en temps et non pas pour l'amplitude de sa plage d'utilisation.

Construction de la distribution La technique de construction de cette distribution ressemble à d'autres, employées pour la conception des bateaux ou pour le choix des voiles embarquées, [Berot, 2015]. Cela se comprend car tout comme les voiles d'un bateau sont des profils aérodynamiques participant à la propulsion, la pale de la girouette est aussi un profil aérodynamique. Elle peut donc être optimisée selon les mêmes principes.

Le vent apparent étant fonction du vent réel et du vent vitesse, pour déterminer celui que va rencontrer le bateau, il faut donc d'une part prendre en compte ses performances, caractérisées par sa polaire, cf. Figure (1.20) et d'autre part le vent réel qu'il va rencontrer, dépendant du programme de navigation. Les utilisateurs ne faisant pas le même usage de leur bateau, courses inshore, America's Cup, courses au large, ils ne sont donc pas soumis à la même météo. De plus, pour la course au large, les conditions rencontrées sont différentes en fonction des courses courues : il n'est pas du tout équivalent de participer à une course telle que "The Transat", le "Vendée Globe" ou bien le record de l'Atlantique nord.

Afin d'estimer la force de vent apparent que le voilier va rencontrer durant sa course, on utilise un logiciel de routage [Adrena, 2016], en spécifiant le parcours à respecter. Puis, le logiciel calcule la route que devrait emprunter le bateau en fonction de ses caractéristiques (polaire de vitesse) et des conditions météo. L'opération est effectuée quelques centaines de fois en utilisant les conditions météorologiques des années passées (par exemple les dix dernières), à la date du départ de la course puis en décalant le départ de quelques jours en avance et en retard. Cette technique permet d'obtenir un ensemble de routes statistiques, cf. Figure (2.28), qui contiennent les informations de météorologie et de vitesse du bateau tout au long de ces routes. On peut alors en déduire le vent apparent perçu par le navire et donc sa répartition statistique (Figure (2.29)). Celle-ci est définie en pourcentage de vitesse de vent apparent, vitesse à laquelle le capteur est susceptible d'être soumis lors de la course correspondante.

Des exemples de distributions de vitesse de vent apparent, obtenus à partir d'un nombre



FIGURE 2.28 – Exemple de 150 routages statistiques pour le parcours de la transat Jacques Vabre 2015 concernant un 60'Imoca. Calculs basés sur les données météorologiques des 10 dernières années avec un balayage de la date de départ à ± 7 jours.

exhaustif de routages statistiques, sont visibles sur la Figure (2.29). Ces courbes nous montrent deux choses : premièrement, que pour un même programme de navigation, en l'occurrence la course "Transat Jacques Vabre" 2015, les distributions de deux bateaux assez similaires (Class40 et IMOCA 60') sont suffisamment différentes pour justifier un processus d'optimisation dédié. La seconde information visible sur cette figure est la grande différence entre les deux distributions des bateaux de course au large et la distribution de l'AC72, bateau de l'America's Cup. Ceci s'explique par leurs performances et programmes de navigation radicalement différents. L'intérêt d'utiliser une distribution plutôt qu'une plage de vent homogène, avec pour seules informations les valeurs minimales et maximales perçues, est qu'avec la seconde alternative, l'outil aurait cherché à dessiner une forme qui serait optimale sur l'ensemble de la plage, alors qu'à ses extrémités, la proportion du temps passée à subir cette force de vent est très faible. Pire, dans le cas extrême de la distribution de l'AC72, qui possède deux pics distincts et symétriques par rapport à la valeur centrale de la plage, en optimisant avec une plage homogène (distribution plate), l'outil va produire un design

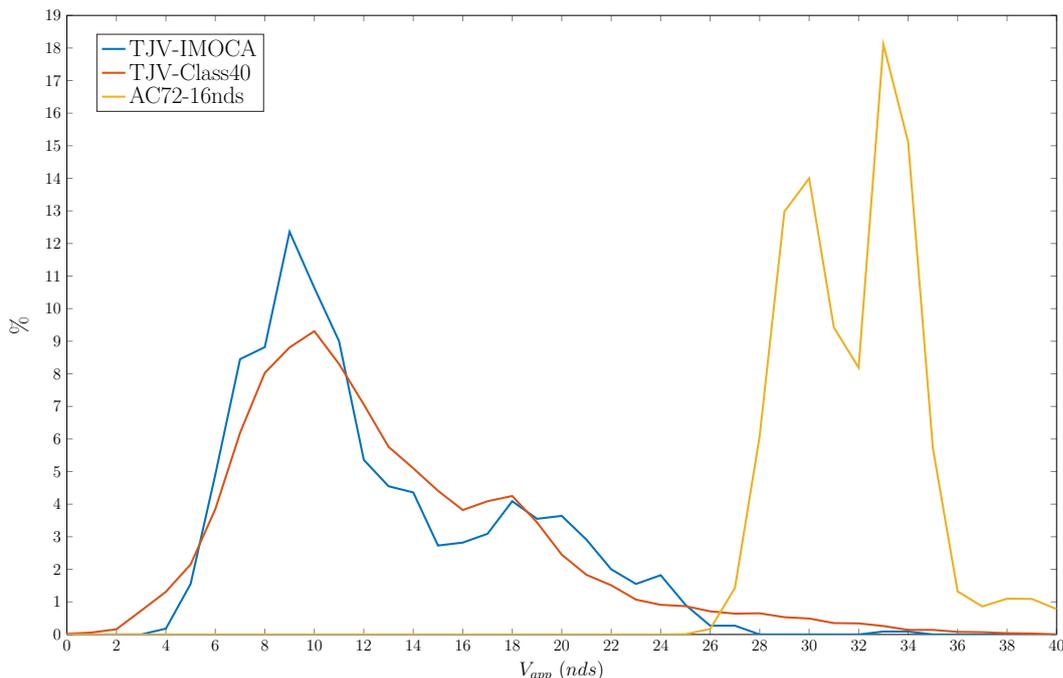


FIGURE 2.29 – Exemple de deux distributions de vent apparent pour le même parcours (Transat Jacques Vabre 2015), mais avec deux bateaux différents (Class40 et IMOCA 60'. Une 3ème distribution est également représentée. Elle est complètement différente des deux premières car elle concerne un AC72 dans 16nds de vent réel. On remarque qu'un 60' qui est plus rapide qu'un Class40, a une distribution moins étendue. Ceci est dû au fait que ce bateau passe plus rapidement les molles et qu'il est capable de contourner les zones avec du vent fort de face. Contrairement aux courses océaniques où l'on retrouve l'ensemble des allures, l'AC72 navigue sur un parcours construit, d'où les 2 pics liés aux allures *VMG* près et *VMG* portant.

qui sera à son optimum pour la valeur centrale de cette plage, alors que pour l'exemple de l'AC72 ce n'est pas le point pour lequel la distribution est la plus élevée, au contraire. La construction de la distribution permet également d'estimer la vitesse maximum de vent apparent que va subir la pale, information utilisée lors de la contrainte $\omega_{p_{max}}$.

La section suivante présente les résultats obtenus grâce à l'application de la méthode d'optimisation proposée.

2.5.3 Résultats

Les paramètres caractérisant la performance de quelques designs de girouettes sont représentés sur la Figure (2.30). Comme vu précédemment, c'est le temps de réponse qui représente le mieux la qualité du design. Plus il est faible, meilleures seront les informations issues du signal. La pulsation est le second paramètre et plus elle est élevée, plus la réactivité et la bande passante seront importantes. Ce qui profitera aux algorithmes de traitement du

signal développés dans la section suivante.

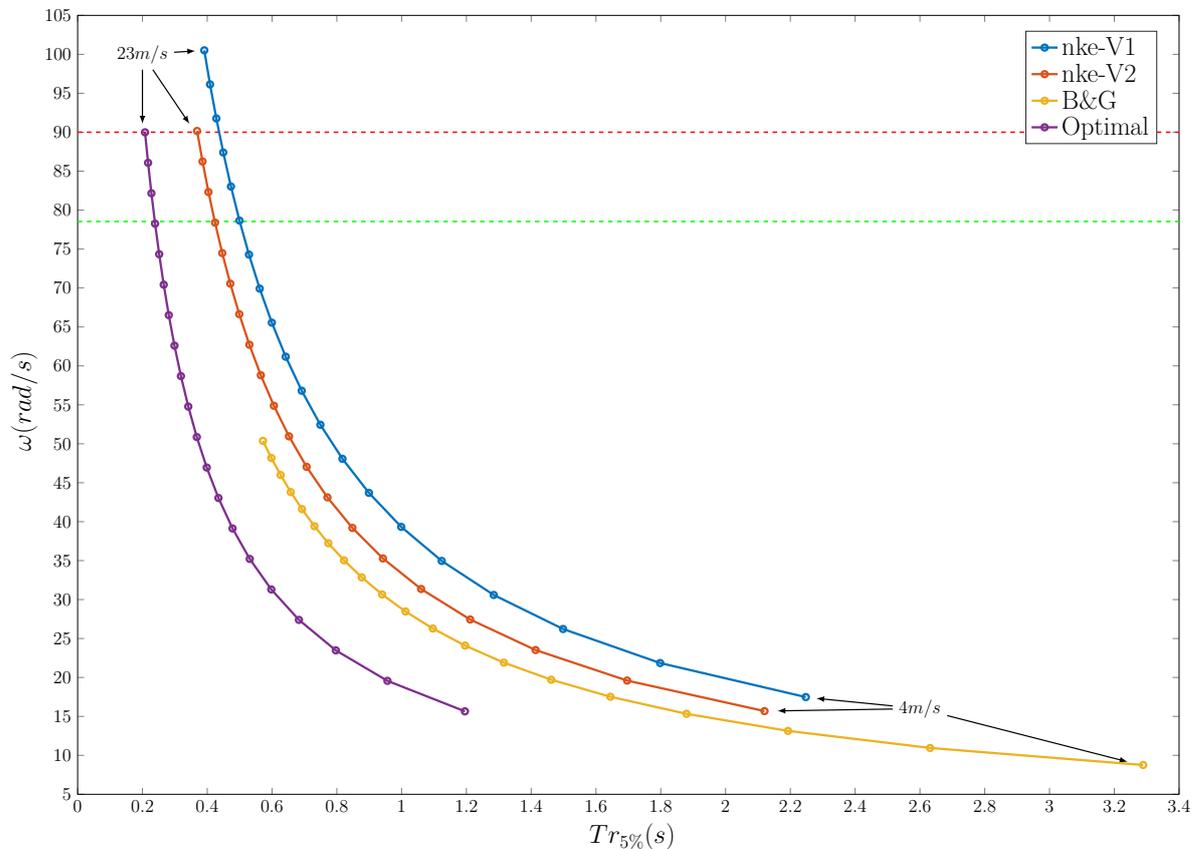


FIGURE 2.30 – Comparaison des performances entre les anciennes pales et la nouvelle pale issue du processus d’optimisation. La pulsation et le temps de réponse sont donnés pour la plage de vent $[4, 23\text{m/s}]$. Chaque point sur la courbe correspond à une vitesse. La zone de performance optimale est située à gauche en haut du graphique (faible Tr et pulsation élevée). Le trait horizontal rouge représente la pulsation $\omega_{p_{max}}$ qu’il ne faut pas dépasser, sous peine de casse mécanique. Enfin, le trait horizontal vert représente la pulsation que l’on cherche à atteindre.

Sur cette figure, 4 designs sont représentés :

nke-V1 : était l’un des premiers dessin utilisé (photo (2.7c)). On remarque que pour la plage de vent spécifiée $[4; 23]\text{m/s}$, la pulsation du design dépasse $\omega_{p_{max}}$; c’est ce qui provoquait la casse matérielle par résonance.

nke-V2 : lui aussi spécifié empiriquement (cf. (2.7d)), avec pour objectif de ne plus se trouver dans le phénomène de résonance, reste bien avec une pulsation inférieure à $\omega_{p_{max}}$. Sa performance au niveau du temps de réponse n’est elle que légèrement améliorée.

B&G : est celui d’un autre fabricant, le domaine de performance n’est pas du tout similaire ; moins de réactivité et avec également un temps de réponse élevé.

Optimal : est le design obtenu par l’application de la méthodologie décrite pour une distribution de vent apparent homogène sur la plage de vent $[4, 23\text{m/s}]$. Son temps

de réponse Tr est très inférieur à celui du précédent design en production : nke-V2. On note une diminution du temps de réponse de 44%, tandis que les performances concernant la pulsation ne sont pas dégradées. Elles restent en limite inférieure de ω_{pmax} . Son dessin est visible sur la Figure (2.31).

En plus des performances attendues, le solveur fournit le plan de la pale. Celui obtenu par le procédé décrit et dont les performances sont exposées sur la Figure (2.30) "Optimal", est comparé au précédent design "nke-V2" sur la Figure (2.31).

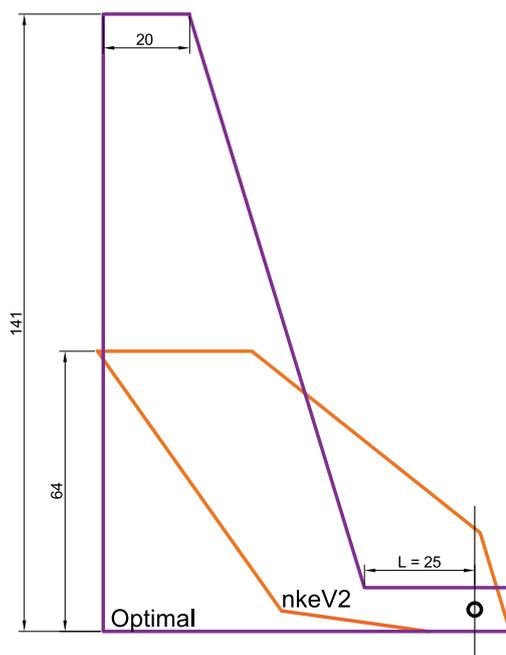


FIGURE 2.31 – Superposition des dessins de l'ancienne pale non optimisée (nke-V2) et de la nouvelle. Cotes en millimètres. Les couleurs font référence aux courbes de la Figure (2.30).

Les matériaux utilisés pour la conception des deux pales étant strictement identiques, les gains de performance ne s'expliquent que par les différences de forme entre ces deux designs. La pale optimisée possède un allongement plus important, une surface légèrement supérieure mais surtout, la partie portante est décalée de l'axe de rotation par la languette L qui fait office de tige. Cela permet de reculer le centre de poussée aérodynamique x_A tout en conservant un moment d'inertie modéré comparé à un design delta sans tige de déport.

Outil logiciel

La technique d'optimisation présentée est assez complexe à mettre en œuvre, de part le nombre important de paramètres à renseigner et du fait que le solveur se commande à l'aide de scripts et lignes de commande. Étant donné que ces travaux ont pour objectif d'être

réutilisés en entreprise par des personnes n'ayant pas développé le code, et pour une durée non connue, un outil logiciel servant d'interface a été développé lors d'un stage [Akra, 2016]. Une capture écran de ce logiciel est visible sur la Figure (2.32). Il permet de renseigner les contraintes et les caractéristiques du matériau, et de définir les objectifs d'optimisation ainsi que de fournir la densité spectrale de vent. Enfin, l'interface permet de lancer le solveur et d'interpréter les résultats.

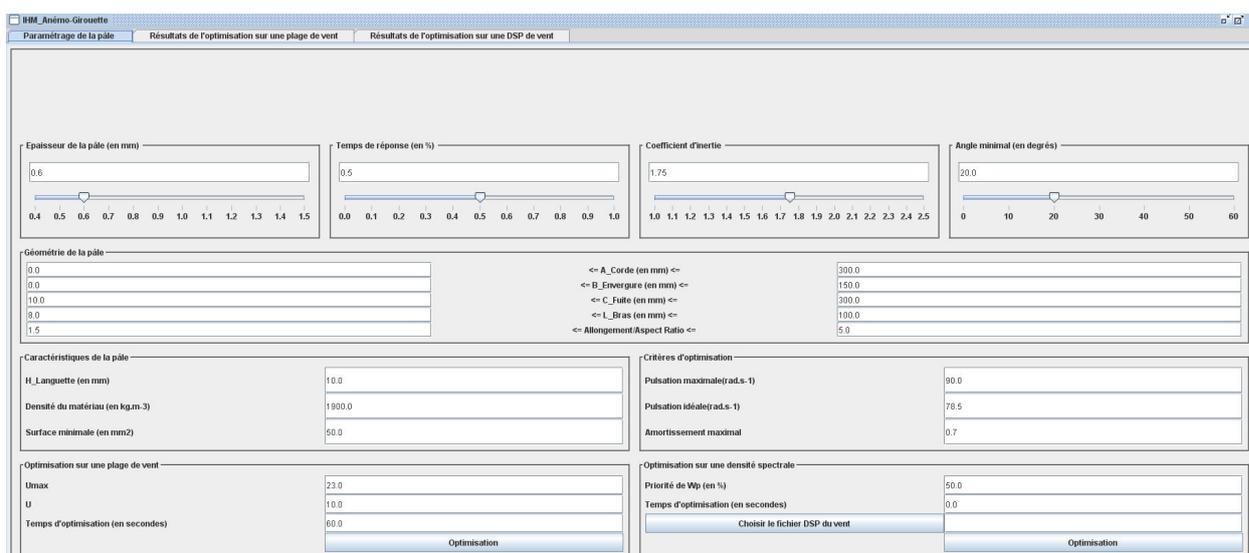


FIGURE 2.32 – Capture d'écran de l'IHM servant à commander les scripts d'optimisation.

2.5.4 Optimisation du contrepoids

Nous avons vu que la girouette est composée de 3 éléments ; une tête en forme de cloche qui contient les 2 roulements et permet de maintenir assemblés les 2 éléments restants : la pale et le contrepoids. Le rôle du contrepoids est d'équilibrer la girouette, de manière à ce que son centre de gravité soit placé sur son axe de rotation. Ainsi, si la girouette est placée à l'horizontale, elle n'est pas déséquilibrée, ni par la pale, ni par son contrepoids. À la manière de l'hélice d'un avion, si l'équilibrage est bien réalisé, alors, lorsque la girouette est lâchée dans n'importe quelle position angulaire, elle doit y rester à l'équilibre.

2.5.4.1 Problématique

Cet équilibrage est donc intéressant quand l'axe de rotation de la girouette n'est pas à la verticale. Or, ce n'est bien souvent pas le cas. Cet axe est en permanence vertical pour les girouettes "météorologiques", fixées sur des mâts de mesures ou dans les jardins des particuliers. Dans le cadre de notre application, l'axe de rotation est très rarement incliné de

manière significative. La carène d'un bateau étant prévue pour fonctionner à une gîte optimale, quand le vent souffle fort, les girouettes sont le plus souvent inclinées à 25° et très rarement à plus de 30°. Nous avons vu avec les équations (2.50) & (2.51), que la performance de la girouette est inversement proportionnelle à son inertie. Il est donc intéressant de travailler à minimiser l'inertie globale à travers l'optimisation de la part attribuée au contrepoids.

L'idée est de calculer l'erreur sur β induite par un déséquilibre du contrepoids, pour ensuite chercher à diminuer la masse ou le bras de levier du contrepoids dans l'objectif de minimiser son inertie, tout en restant dans la marge d'erreur que l'on tolère sur β .

2.5.4.2 Mise en équation

Le moment aérodynamique est repris d'après l'équation (2.47) : $\mathcal{M}_{Aero} = x_A \times \frac{1}{2} \rho S V^2 K_\lambda \alpha_i$.
L'objectif est que le moment créé par le déséquilibre $\mathcal{M}_{desquilibre}$, soit inférieur au moment aéro \mathcal{M}_{Aero} , pour une vitesse et un angle d'incidence spécifiés (V_{min} , α_{imax}).

Partant du postulat que le vent souffle dans un plan purement horizontal, alors on peut écrire d'après les moments respectifs de la pale et du contrepoids exercés par la gravité :

$$\mathcal{M}_{pale} = g \times \sin \phi \times m_p x_G \quad (2.75)$$

$$\mathcal{M}_{cp} = g \times \sin \phi \times m_{cp} r_{cp} \quad (2.76)$$

Que pour que la girouette soit à l'équilibre il faut que :

- la somme des moments soit nulle,
- la valeur absolue du moment aéro soit supérieure à celle créée par le déséquilibre.

On peut alors écrire :

$$|\mathcal{M}_{Aero}| \geq |\mathcal{M}_{desquilibre}| \quad (2.77)$$

$$|\mathcal{M}_{Aero}| \geq |\mathcal{M}_{pale} - \mathcal{M}_{cp}| \quad (2.78)$$

En isolant la distance r_{cp} , séparant le contrepoids de l'axe de rotation, on peut en déduire la distance minimale qui provoque un déséquilibre rattrapé par \mathcal{M}_{Aero} :

$$r_{cp} \geq \frac{m_p x_G - \frac{\mathcal{M}_{Aero}}{g \sin \phi}}{m_{cp}} \quad (2.79)$$

2.5.4.3 Application numérique

Pour appliquer cette technique d'optimisation, il faut spécifier quelle erreur on accepte de tolérer et pour quelle vitesse de vent et de gîte correspondante. On remarque avec les équations (2.75) & (2.47), que le moment créé par le déséquilibre augmente avec la gîte. Or, la gîte sur un bateau est provoquée par la force du vent. On est donc dans un système stable : plus le vent va forcer, plus la gîte va augmenter, et plus le moment créé par le déséquilibre sera important (de manière linéaire). Alors que dans le même temps, plus le vent augmente, plus le moment aérodynamique sur la pale augmente (proportionnellement au carré de la vitesse).

On peut alors spécifier l'erreur acceptée en fonction d'une vitesse minimale de vent et d'une gîte maximale associée à cette vitesse. L'application numérique suivante correspond à un cas défavorable au près :

- $\alpha_{i_{max}} = 1^\circ$, on accepte d'avoir au maximum une erreur statique d' 1° ,
- $V_{min} = 10nds$, pour une vitesse de vent apparent de $10nds$,
- $\phi = 25^\circ$, la gîte maximale associée à cette vitesse de vent.

Alors, pour la pale et le contrepoids actuellement en usage chez nke, les résultats proposent de réduire la distance r_{cp} de $9mm$, ce qui permet de réduire l'inertie de 24%. Soit pour ce design, une réduction du temps de réponse de 30%. La Figure (2.33) expose les gains attendus sur le temps de réponse en fonction de l'erreur tolérée pour les vitesses et gîtes correspondantes.

Le travail d'optimisation déséquilibre la girouette par la réduction de la distance séparant le contrepoids de l'axe de rotation. Quand, comme sur la courbe " $V = 10nds$ & $\phi = 15^\circ$ " de la Figure (2.33), cette distance ne peut plus être réduite, il est alors possible de réduire la masse du contrepoids.

D'après l'équation (2.76), le moment est proportionnel à la masse et à la distance contrepoids-axe de rotation. Pour travailler l'équilibrage on peut alors agir indépendamment sur l'un ou l'autre de ces paramètres. En pratique, comme le moment d'inertie est lui fonction de la masse et du rayon au carré, on préférera donc minimiser le rayon pour minimiser l'inertie. Alors, pour le même équilibrage, on choisira un contrepoids avec la masse la plus élevée, permettant de réduire au maximum la distance r_{cp} . Ainsi, le moment d'inertie sera dans le même temps optimisé.

2.5.4.4 Déséquilibre d'accélération

Comme le contrepoids n'équilibre plus la pale, l'ensemble n'est plus équilibré lorsqu'il est soumis à la gravité, mais aussi quand il subit une accélération, provoquée par un choc sur une vague par exemple. Il faut alors prendre en compte l'erreur sur la direction que l'on tolère. Sachant que cette accélération est due à un mouvement de l'aérien, y est associé un changement de direction du vent apparent. L'erreur de déséquilibre causée par cette

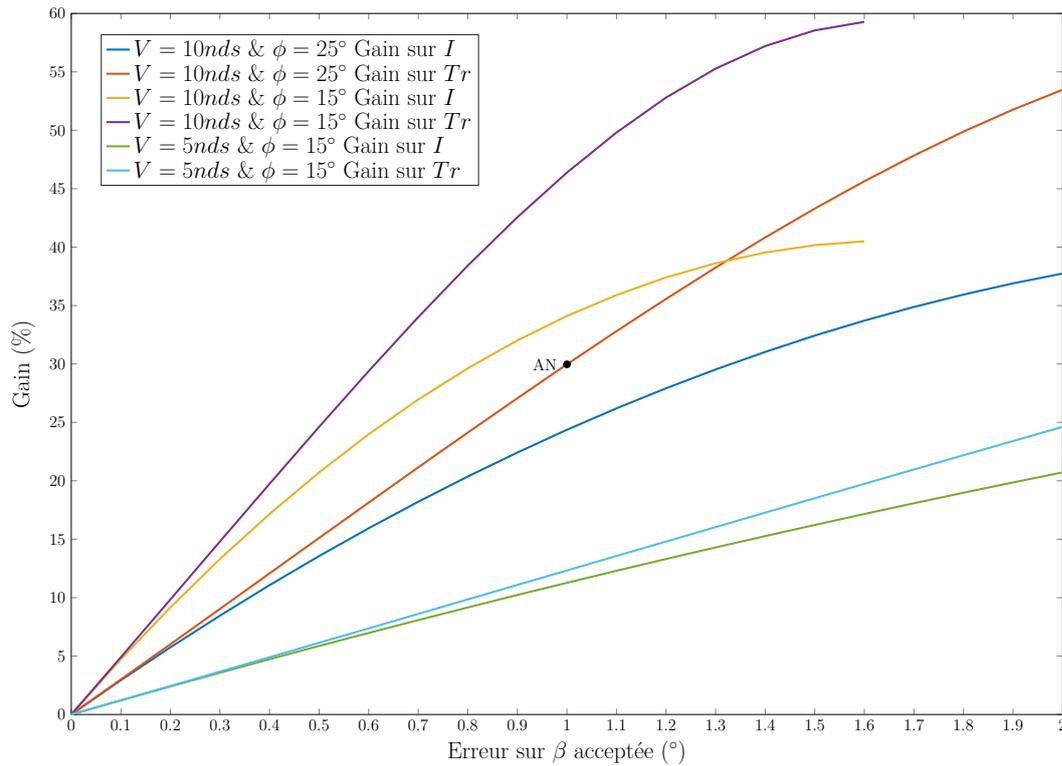


FIGURE 2.33 – Gains de performance obtenus par le déséquilibre du contreponds en fonction de l'erreur statique tolérée sur la pale actuellement en usage chez nke, "nke-V2". Le point "AN" correspond à l'application numérique de l'exemple ci-dessus. Les courbes $V = 10nds$ & $\phi = 15^\circ$ s'arrêtent pour une erreur statique de $1,6^\circ$, car ensuite, le contreponds ne peut plus être rapproché de l'axe de rotation. Il faudrait alors passer sur un contreponds d'une masse plus faible.

accélération sera alors en avance de phase, car c'est la pale qui possède le moment d'inertie le plus élevé comparé au contreponds. Ainsi, l'inéquation (2.79) est réécrite sous la forme suivante :

$$r_{cp} \geq \frac{m_p x_G - \frac{\mathcal{M}_{Aero}}{g \times a}}{m_{cp}} \quad (2.80)$$

On se rend alors compte que c'est ce facteur qui est limitant par rapport à l'erreur acceptée pour la gîte. Pour l'application précédente, si l'on accepte une erreur par avance de phase de $1,5^\circ$ pour une accélération de $2g$, alors le contreponds ne peut être rapproché que de $5mm$, contrairement aux $9mm$ précédemment proposés. Le gain sur le temps de réponse reste tout de même de 17% , ce qui est loin d'être négligeable.

Cette technique permet aussi de gagner du temps lors de la fabrication de la girouette. En effet, l'étape de l'équilibrage est relativement longue car il faut ajuster précisément la position du contreponds en vissant plus ou moins une tige filetée pour que l'équilibrage soit correct. Avec cette nouvelle approche, la position du contreponds est définie par rapport à

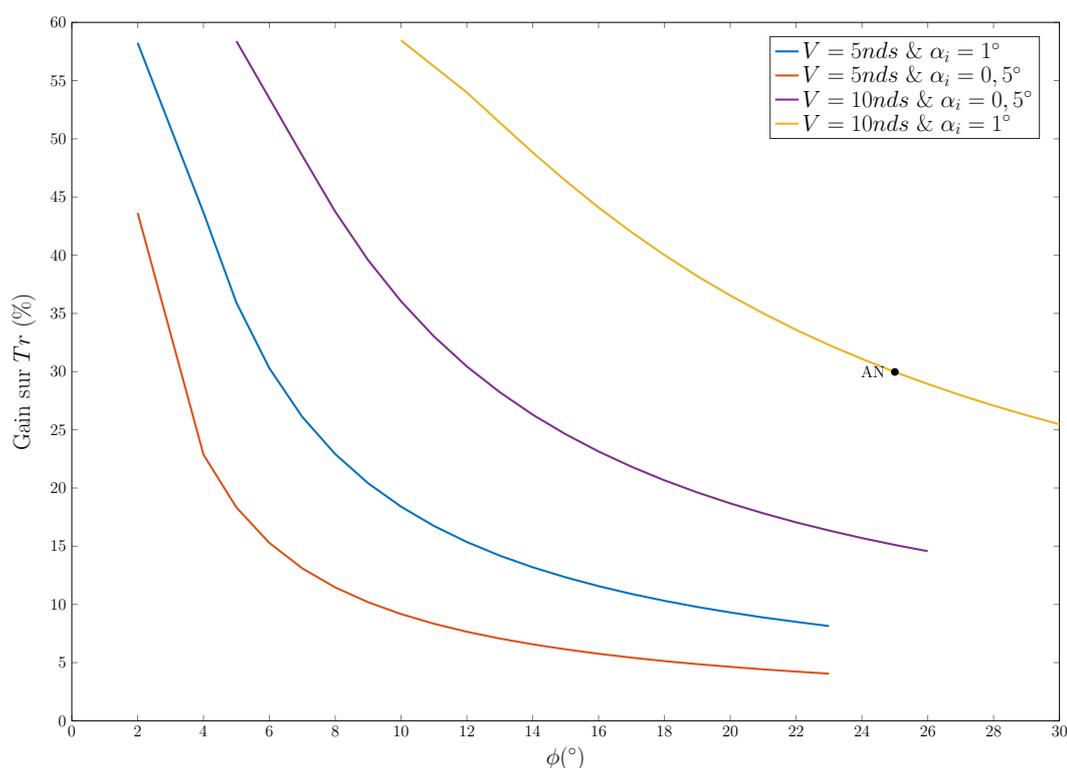


FIGURE 2.34 – Gains sur le temps de réponse obtenus par le déséquilibre du contrepoids en fonction de la gîte du bateau, pour des vitesses de vent et une erreur spécifiées. Calculs valides pour la pale et le contrepoids "nke-V2".

une cote. L'ensemble peut alors être rapidement vissé à la position finale à l'aide d'une cale.

2.5.5 Conclusion

La technique d'optimisation de la forme de la pale exposée permet de dessiner des formes qui réduisent de plus de 40% le temps de réponse de la girouette, tout en conservant le même matériau de construction. Nous venons de voir qu'il est également possible de gagner plusieurs dizaines de pourcentages supplémentaires en travaillant sur le positionnement et la masse du contrepoids. Le temps de réponse de la girouette a ainsi été divisé par 2. De plus, les outils mis en place permettent, à l'aide des densités spectrales de vent représentatives des cas d'utilisation, de dessiner des pales spécifiquement adaptées aux programmes de navigation. L'entreprise nke aura alors à son catalogue une pale standard, qui conviendra à la plupart de ses clients. Ainsi, il lui est maintenant possible de proposer un design spécifiquement optimisé pour un type de bateau, et même pour une course bien spécifique.

Le travail d'optimisation exposé dans ces dernières sections s'est concentré sur la

mécanique du capteur. Nous allons maintenant nous intéresser à l'information fournie par l'aérien, et voir si il est possible d'améliorer sa réponse en lui appliquant des algorithmes de traitement du signal.

2.6 Traitement du signal prédictif

Nous venons de voir dans la section précédente comment définir la forme du capteur ayant la meilleure réponse à une perturbation. Cependant, bien que les performances obtenues avec ce nouveau design soient en nette amélioration, le capteur reste de type mécanique. Sa performance est donc liée au temps nécessaire pour mettre en mouvement, puis stabiliser sa partie mobile. Ce qui entraînera toujours un retard mécanique. Les travaux exposés dans cette section se concentrent sur le traitement du signal issu de l'aérien. L'objectif de ces travaux est de compenser le déphasage du signal dû au comportement des pièces mécaniques et d'améliorer la précision de la mesure, en s'aidant de la prédiction du comportement dynamique du capteur : ce comportement étant modélisé par les équations que nous avons développées dans la section 2.4.

2.6.1 Introduction & théorie

Nous avons vu que la girouette peut être assimilée à un système du 2nd ordre, régit par une équation différentielle à coefficients constants. Intégrer cette équation dans un filtre prédictif pourrait alors permettre d'estimer la direction de la perturbation à l'origine du mouvement de l'aérien. L'un des filtres prédictif le plus connu, et bien adapté à ce type de problématique, est le filtre de Kalman [Kalman, 1960]. C'est une méthode numérique, permettant d'estimer les paramètres d'un système évoluant dans le temps, à partir d'une série de mesures et des caractéristiques des capteurs. L'intérêt de ce filtre est qu'il permet d'intégrer le modèle du système, ce qui permet de faire le lien entre les mesures et les données à estimer, et d'intégrer les effets des actionneurs si le système en dispose.

2.6.1.1 Le filtre de Kalman

Nous exposons dans cette section la théorie du filtre de Kalman linéaire. Un exemple de cette technique de traitement du signal est mis en application sur le capteur speedomètre [Kerhascoët *et al.*, 2016].

Le filtre de Kalman permet d'estimer l'état futur d'un système, en fonction de son état précédent, des mesures réalisées et des éventuelles commandes appliquées. Il peut être résumé comme étant un ensemble d'équations qui implantent un estimateur prédictif. Ce dernier minimise la covariance de l'erreur estimée.

Nous allons maintenant voir son implantation discrétisée, lorsque les mesures et les estimations sont réalisées à des points discrets dans le temps.

2.6.1.1.1 Hypothèses Le filtre est caractérisé par deux équations [Grewal *et al.*, 2013] :

1. L'équation d'état, qui caractérise l'évolution du système :

$$X_{k+1} = F_k X_k + G_k U_k + w_k \quad (2.81)$$

Où F_k est la matrice de transition d'état, qui modélise la transition entre deux estimations à l'instant k . G_k modélise l'action du vecteur de commande U_k sur le vecteur d'état X_k , qui représente l'état du système modélisé à l'instant k .

2. L'équation de mesure, qui associe le vecteur de mesure y_k à l'estimation X_k par le biais de la matrice d'observation H_k :

$$y_k = H_k X_k + v_k \quad (2.82)$$

Avec w_k et v_k représentant respectivement le bruit de modèle et le bruit de mesure. Ils sont considérés indépendants, de bruits blancs centrés et de matrices de covariances Q_k et R_k connues :

$$p(w) \sim N(0, Q_k) \quad (2.83)$$

$$p(v) \sim N(0, R_k) \quad (2.84)$$

L'état du filtre est représenté par deux variables :

$\hat{X}_{k|k}$ L'estimation a posteriori au temps k qui est fonction des observations passées et de l'actuelle k .

$P_{k|k}$ La matrice de covariance de l'erreur.

Le calcul du filtre se déroule ensuite en deux étapes récursives : la prédiction et la linéarisation. Il permet alors de garantir que l'erreur sur l'estimation est en moyenne nulle, tout en minimisant l'incertitude sur cette erreur.

2.6.1.1.2 Prédiction Cette étape prédit l'estimation a priori de l'équation d'état $\hat{X}_{k|k-1}$, qui minimise la covariance de l'erreur $P_{k|k-1}$.

$$\hat{X}_{k|k-1} = F_k \hat{X}_{k-1|k-1} + G_k U_k \quad (2.85)$$

Le principe du filtre de Kalman est de minimiser la covariance de l'erreur. Elle se déduit de l'équation (2.81) d'après :

$$P_{k|k-1} = F_k P_{k-1|k-1} F_k^T + Q_k \quad (2.86)$$

Après la prédiction, vient l'étape de la mise à jour.

2.6.1.1.3 Mise à jour Cette étape consiste à prendre en compte la dernière mesure obtenue pour calculer le gain K_k . Celui-ci minimisera la covariance de l'erreur estimée. K_k est fonction de son état précédent, de la matrice d'observation H_k et du bruit de mesure R_k . Il est obtenu d'après le théorème récursif des moindres carrés, qui permet de minimiser la somme des carrés des erreurs :

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \quad (2.87)$$

Les estimations a posteriori du vecteur d'état $\hat{X}_{k|k}$ et de la covariance $P_{k|k}$, sont mises à jour à l'aide du nouveau gain de Kalman (2.87) et du dernier vecteur de mesure y_k :

$$\hat{X}_{k|k} = \hat{X}_{k|k-1} + K_k (y_k - H_k \hat{X}_{k|k-1} - H_k G_k U_k) \quad (2.88)$$

$$P_{k|k} = P_{k|k-1} - K_k H_k P_{k|k-1} \quad (2.89)$$

L'estimation a posteriori (2.88), est construite à partir de l'estimation a priori (2.85), corrigée du terme $K_k (y_k - H_k \hat{X}_{k|k-1} - H_k G_k U_k)$. C'est ce que l'on appelle l'innovation. Elle représente la quantité d'information supplémentaire apportée par la dernière mesure. Cette innovation est pondérée par le gain K_k , qui permet de quantifier l'importance à apporter à cette nouvelle mesure. D'après (2.87), K_k est inversement proportionnel à R_k et proportionnel à P_k . Ainsi, plus le bruit de mesure est faible, ou plus l'incertitude sur l'estimation est grande, plus le filtre accorde de l'importance à la mesure plutôt qu'à la dernière estimation, et inversement.

Pour s'assurer de la stabilité du filtre et pour déterminer quelle confiance on peut lui accorder, il peut être intéressant de travailler sur la covariance de l'innovation :

$$S_k = H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k \quad (2.90)$$

On préférera alors la calculer car elle peut être réutilisée pour déterminer K_k . L'équation (2.87) devient alors :

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T S_k^{-1} \quad (2.91)$$

2.6.1.1.4 Initialisation La convergence du filtre va grandement dépendre de son étape d'initialisation, c'est pourquoi il faut y apporter le plus de précautions possibles.

X étant une variable aléatoire, l'estimation au temps $k = 0$ est obtenue d'après son espérance :

$$\hat{X}_0 = \mathbb{E}(X_0) \quad (2.92)$$

La covariance de l'erreur est elle initialisée par :

$$\hat{P}_0 = \mathbb{E}((X_0 - \hat{X}_0)(X_0 - \hat{X}_0)^T) \quad (2.93)$$

Si l'état du système est connu, alors $\hat{X}_0 = X_0$ et \hat{P}_0 est nulle.

Après avoir discuté de la théorie du filtre de Kalman, nous allons appliquer cette théorie au système physique qu'est la girouette.

2.6.2 Application à la girouette

Maintenant que nous disposons des équations régissant le comportement dynamique de la girouette développées dans la section 2.4, il nous est possible de les intégrer dans le filtre de Kalman, dont la théorie vient d'être exposée.

2.6.2.1 Méthodologie d'optimisation de la girouette

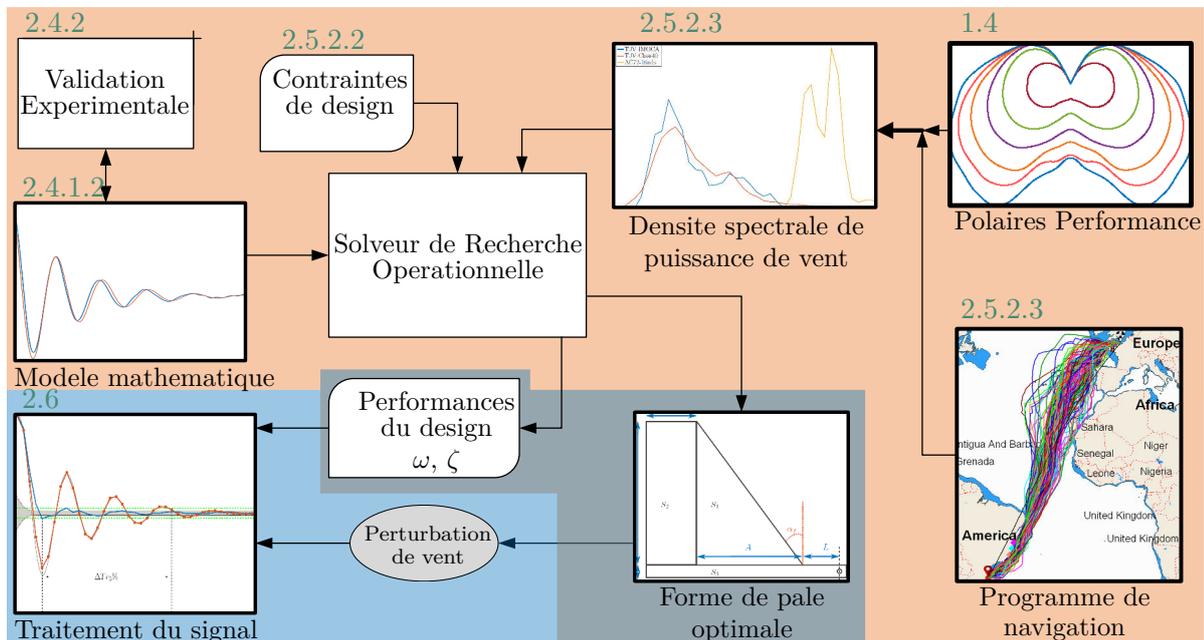


FIGURE 2.35 – Rappel de la Figure (2.9) et résumé le processus d'optimisation de la girouette dans sa globalité. Nous avons jusqu'à présent détaillé les méthodes sur fond orange, permettant d'obtenir la forme de pale optimale et ses performance. La suite de ce chapitre concerne les méthodes sur fond bleu et se consacre au traitement du signal lorsque que le capteur est sollicité par une perturbation du vent.

La Figure (2.35) résume le processus d'optimisation de la girouette pour améliorer la qualité et la réactivité de l'information sur la direction du vent apparent. Les travaux sur fond orange ont été décrits dans les sections précédentes et nous permettent maintenant d'associer un design à son comportement dynamique, grâce à l'équation différentielle du 2nd ordre à coefficient constant (2.49) :

$$\ddot{\beta} + 2\omega_0\zeta\dot{\beta} + \omega_0^2\beta = \omega_0^2\gamma - \frac{C_r}{I}$$

C'est cette équation qu'il faut traduire en matrice de transition d'état F équation (2.81), afin de l'intégrer dans le filtre de Kalman.

2.6.2.2 Mise en équations

L'équation différentielle (2.49) est linéaire. Elle peut donc être utilisée dans la forme classique du filtre de Kalman et peut se réécrire sous la forme suivante :

$$\ddot{\beta} = -2\omega_0\zeta\dot{\beta} - \omega_0^2\beta + \omega_0^2\gamma - \frac{C_r}{I} \quad (2.94)$$

On peut donc faire le lien avec le vecteur d'état $\begin{bmatrix} \gamma \\ \beta \\ \dot{\beta} \end{bmatrix}$ et sa représentation avec les dérivées de plus haut niveau $\begin{bmatrix} \dot{\gamma} \\ \dot{\beta} \\ \ddot{\beta} \end{bmatrix}$ via la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} \dot{\gamma} \\ \dot{\beta} \\ \ddot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \omega_0^2 & -\omega_0^2 & -2\omega_0\zeta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma \\ \beta \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \frac{C_r}{I} \quad (2.95)$$

Alors, on retrouve la matrice de transition d'état :

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \omega_0^2 & -\omega_0^2 & -2\omega_0\zeta \end{bmatrix} \quad (2.96)$$

Cependant, l'équation d'état (2.81) n'est valable que pour des équations en temps continu. Du fait de la numérisation, l'algorithme implanté sur le micro-contrôleur, travaille en temps discret. Il faut donc trouver une forme équivalente à la matrice de transition (2.96) mais dans le domaine discret.

Pour cette application, le temps de discrétisation est invariant. Il est donc possible de trouver

un équivalent Φ à F , en passant par le domaine de Laplace [Musoff et Zarchan, 2009], d'après la relation suivante :

$$\Phi(s) = (sI - F)^{-1} = \begin{bmatrix} s & 0 & 0 \\ 0 & s & -1 \\ -\omega_0^2 & \omega_0^2 & s + 2\omega_0\zeta \end{bmatrix}^{-1} \quad (2.97)$$

$$\Phi(s) = \begin{bmatrix} \frac{1/s}{\omega_0^2} & 0 & 0 \\ \frac{s + 2\omega_0\zeta}{s(\omega_0^2 + 2\zeta\omega_0s + s^2)} & \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 + 2\zeta\omega_0s + s^2} & \frac{1}{\omega_0^2 + 2\zeta\omega_0s + s^2} \\ \frac{-\omega_0^2}{(\omega_0^2 + 2\zeta\omega_0s + s^2)} & \frac{-\omega_0^2}{\omega_0^2 + 2\zeta\omega_0s + s^2} & \frac{s}{\omega_0^2 + 2\zeta\omega_0s + s^2} \end{bmatrix} \quad (2.98)$$

On repasse ensuite dans le domaine temporel discrétisé via la transformée de Laplace inverse de la résolvante de F en s , qui est donnée par :

$$\Phi(t) = \mathcal{L}^{-1}[(sI - F)^{-1}] \quad (2.99)$$

Soit,

$$\Phi(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} & \Phi_{23} \\ \Phi_{31} & \Phi_{32} & \Phi_{33} \end{bmatrix} \quad (2.100)$$

Avec :

$$\Phi_{21} = 1 - \frac{e^{-\omega_0\zeta t} (\cosh(\omega_0 t \sqrt{\zeta^2 - 1}) + (\zeta \sinh(\omega_0 t \sqrt{\zeta^2 - 1})))}{\sqrt{\zeta^2 - 1}} \quad (2.101)$$

$$\Phi_{22} = \frac{e^{-\omega_0\zeta t} (\cosh(\omega_0 t \sqrt{\zeta^2 - 1}) + (\zeta \sinh(\omega_0 t \sqrt{\zeta^2 - 1})))}{\sqrt{\zeta^2 - 1}} \quad (2.102)$$

$$\Phi_{23} = \frac{e^{-\omega_0\zeta t} \sin(\omega_0 t \sqrt{1 - \zeta^2})}{\omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (2.103)$$

$$\Phi_{31} = \frac{\omega_0 e^{-\omega_0\zeta t} \sin(\omega_0 t \sqrt{1 - \zeta^2})}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (2.104)$$

$$\Phi_{32} = -\frac{\omega_0 e^{-\omega_0\zeta t} \sin(\omega_0 t \sqrt{1 - \zeta^2})}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (2.105)$$

$$\Phi_{33} = e^{-\omega_0\zeta t} \cosh(\omega_0 t \sqrt{\zeta^2 - 1}) - \frac{\zeta \sinh(\omega_0 t \sqrt{\zeta^2 - 1})}{\sqrt{\zeta^2 - 1}} \quad (2.106)$$

En reprenant l'équation de la représentation d'état (2.95), on identifie la matrice de commande $G = [0 \ 0 \ -1]^T$. Celle-ci permet d'intégrer la résistance des roulements, qui est vue comme une commande externe à travers le vecteur $U_k = \frac{Cr}{I}$. G doit également être discrétisée. Pour cela, on utilise la formule :

$$G_k = \int_0^t \Phi(t) G dt \quad (2.107)$$

Qui permet d'obtenir la matrice suivante :

$$G_k = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{e^{-\omega_0 \zeta t} (\zeta \sin(\omega_0 t \sqrt{1 - \zeta^2}) + \sqrt{1 - \zeta^2} \cos(\omega_0 t \sqrt{1 - \zeta^2}))}{\omega_0^2 \sqrt{1 - \zeta^2}} - \frac{1}{\omega_0^2} \\ \frac{-\sinh(\omega_0 t \sqrt{\zeta^2 - 1}) e^{-\omega_0 \zeta t}}{\omega_0 \sqrt{\zeta^2 - 1}} \end{bmatrix} \quad (2.108)$$

Concernant la matrice de bruit de modèle Q_k , elle peut, dans le cas d'un système invariant, être approximée d'après [Farell, 2008], via la matrice continue Q et Φ par :

$$Q_k = \Phi Q \Phi^T t \quad (2.109)$$

Avec Q , la matrice de bruit de modèle qui représente la confiance que l'on accorde à la représentation mathématique :

$$Q = \begin{bmatrix} \varepsilon_\gamma^2 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_\beta^2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{\dot{\beta}}^2 \end{bmatrix} \quad (2.110)$$

ε_γ , ε_β & $\varepsilon_{\dot{\beta}}$ étant respectivement les variances des erreurs de modélisation sur l'angle d'incidence, la position de la pale et son accélération.

L'application de l'équation (2.109) a pour conséquence que la matrice Q_k ne contient pas uniquement des termes sur sa diagonale mais reste tout de même symétrique. Voici un exemple numérique pour notre application :

$$Q_k = \begin{bmatrix} 0,0501 & 0,0001 & 0,1013 \\ 0,0001 & 0,0100 & -0,0201 \\ 0,1013 & -0,0201 & 0,2553 \end{bmatrix} \quad (2.111)$$

Si l'on reprend l'équation (2.86), on comprend que ces valeurs seront à chaque itération ajoutées à la matrice de covariance P_k . C'est pourquoi il faut que Q_k soit absolument symétrique, afin de respecter celle de P_k . On en déduit également que P_k ne pourra jamais être inférieur à Q_k .

La matrice d'observation H , ainsi que la matrice de covariance du bruit de mesure R , sont obtenues d'après la relation décrite par l'équation de mesure (2.82) :

$$y = HX + R = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \gamma \\ \beta \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} + \varepsilon_{\beta_{mes}}^2 \quad (2.112)$$

Nous avons vu dans le paragraphe 2.2.2.1.1, que la résolution numérique du capteur angulaire de la girouette, est de $q = 0,17^\circ$. Alors, l'erreur de mesure due à la quantification $\varepsilon_{\beta_{mes}}$, peut être estimée à partir de l'écart type de l'erreur de quantification q , qui s'obtient d'après la relation suivante :

$$\varepsilon_{\beta_{mes}} = \frac{q}{\sqrt{12}} = 0,0491 \quad (2.113)$$

La matrice R est donc constante et se limite à $R = [\varepsilon_{\beta_{mes}}^2]$.

La section suivante va présenter les résultats obtenus en appliquant notre méthode.

2.6.2.3 Performance du filtre

Les résultats présentés sont obtenus par l'application du filtre de Kalman décrit sur une oscillation de la pale 1c (cf. Figure (2.24)) enregistrée à 50Hz, pour une vitesse de veine de la soufflerie de 10m/s.

On remarque sur la Figure (2.36) que l'estimation de la direction de la perturbation $\hat{\gamma}$, converge dans la bande des 5% en seulement 77ms, alors qu'il faut 487ms à la pale pour que son oscillation reste contenue dans cette bande des 5% d'erreur. L'application de cette technique de filtrage prédictive permet donc de diviser le temps de réponse par 6, soit 3 fois plus que le gain obtenu par l'optimisation du design, bien que dans cet exemple, les conditions ne soient pas optimales car le filtre n'a pas été initialisé. Il faut donc que le filtre fasse converger la matrice de covariance P et le gain de Kalman K . Cette période est visible sur le graphique et correspond à la durée de stabilisation de $P(\hat{\gamma})$.

2.6.2.4 Puissance de calcul

Le nombre d'opérations flottantes nécessaires à l'application du filtre de Kalman décrit peut être déterminé à partir de la taille des matrices en jeu, et donc d'après les dimensions du vecteur d'état et de mesure, en se basant sur le coût d'une multiplication et d'une inversion matricielle. Pour notre application, la mise à jour complète du filtre nécessite 327 multiplications flottantes. Ce filtre a pour objectif d'être intégré dans un micro-contrôleur existant (un M16C de chez Renesas), dont la charge actuelle permet d'allouer 5MIPS à

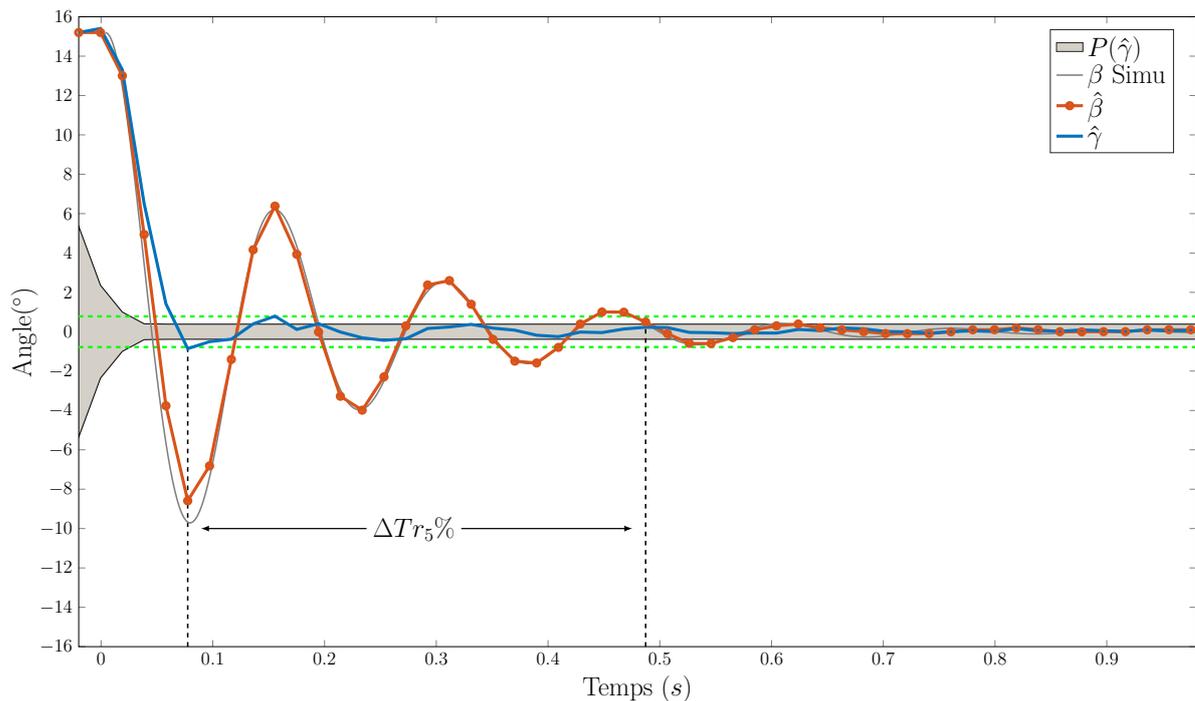


FIGURE 2.36 – Réponse de la girouette montée avec la pale 1c, à un échelon de 15° . Oscillations enregistrées en soufflerie pour une vitesse de veine de 10m/s . Cette figure permet de comparer l'évolution de la position angulaire de la girouette $\hat{\beta}$ et l'estimation de la direction de la perturbation $\hat{\gamma}$. $P(\hat{\gamma})$ est issue de la matrice de covariance du filtre et représente l'incertitude sur l'estimation de $\hat{\gamma}$. Les deux lignes horizontales représentent la marge d'erreur à 5%. On remarque que la pale (β), se stabilise dans la bande des 5% au bout de 487ms , tandis que l'estimation de la perturbation $\hat{\gamma}$, converge et reste dans cette bande des 5% en seulement 77ms . Soit 16% du temps de convergence normalement nécessaire lorsque le traitement du signal n'est pas appliqué.

cette tâche. Sachant qu'une multiplication flottante nécessite 160 instructions sur ce type de micro-contrôleur, il ne reste plus que 31250 opérations flottantes par seconde de disponibles, pour la mise à jour du filtre de Kalman. La fréquence maximale à laquelle peut être mis à jour le filtre est donc de $31250/327 = 95\text{Hz}$. Ce qui est supérieur à la limite imposée par le théorème de Shannon, à savoir $2 \times 90\text{rad/s} = 30\text{Hz}$. En pratique, on se limitera à 50Hz ; la fréquence d'échantillonnage de l'aérien.

Ces estimations sont valables lorsque les matrices Φ_k et Q_k ne sont pas recalculées à chaque itération. Or, elles sont toutes deux fonction de ω_0 , qui est lui-même fonction du vent apparent. Deux solutions sont envisageables : soit pré-calculer ces deux matrices pour chaque vitesse de vent de la plage d'utilisation et les stocker sous forme de tables, ou bien, si les ressources le permettent, ou si le micro est équipé de primitives de traitement du signal câblées, les calculer à chaque itération.

La technique de traitement du signal que nous venons d'appliquer à la girouette peut être appliquée à n'importe quel système mécanique, du moment qu'il est possible de traduire son comportement par une matrice de transition d'état. Il est donc judicieux d'appliquer le même raisonnement au deuxième élément mécanique qui compose l'aérien, à savoir l'anémomètre.

2.6.3 Application à l'anémomètre

L'anémomètre est également un capteur mécanique, on peut donc essayer de lui appliquer la même stratégie de traitement du signal que celle mise en place pour la girouette. Trois approches sont exposées dans cette section : par l'équation différentielle à 3 godets, par l'équivalence d'un 1^{er} ordre et d'après le point de vue du couple.

2.6.3.1 Via l'équation du mouvement à 3 godets :

Nous avons vu dans la section 2.3 que le comportement d'un anémomètre à 3 godets peut être modélisé d'après l'équation différentielle suivante :

$$I\ddot{\theta} = \frac{1}{2}\rho S R_r V_f^2(\theta) C_p(\alpha_i(\theta)) + \frac{1}{2}\rho S R_r V_f^2(\theta+120) C_p(\alpha_i(\theta+120)) + \frac{1}{2}\rho S R_r V_f^2(\theta+240) C_p(\alpha_i(\theta+240)) \quad (2.114)$$

Or, cette équation n'est pas linéaire et est dépendante de l'angle d'incidence du vent α_i , elle n'est donc pas directement applicable dans le filtre de Kalman classique. De plus, la performance de ce filtre serait dépendante de la précision obtenue par la girouette sur l'estimation de α_i .

Afin de s'abstraire de α_i , il est préférable d'observer le moulinet dans sa globalité et non pas comme une somme de 3 godets.

2.6.3.2 Via l'équivalence d'un 1^{er} ordre :

Si l'on observe la dynamique du rotor discrétisée à chaque tour complet, (cf. section 2.3), alors son comportement peut être assimilé à un 1^{er} ordre, régit par l'équation différentielle suivante :

$$\tau_a \ddot{\theta} + \dot{\theta} = \dot{\theta}_f \quad (2.115)$$

Avec $\dot{\theta}_f$ la vitesse de rotation en régime établi et τ_a la constante de temps spécifique à l'anémomètre.

Cette approche implique également l'utilisation d'une équation différentielle non linéaire, mais contrairement à (2.114), celle-ci n'est plus dépendante de α_i , ni de la position absolue

de θ . La Figure (2.37), représente le résultat obtenu par l'implantation de l'équation (2.115) dans un filtre de Kalman.

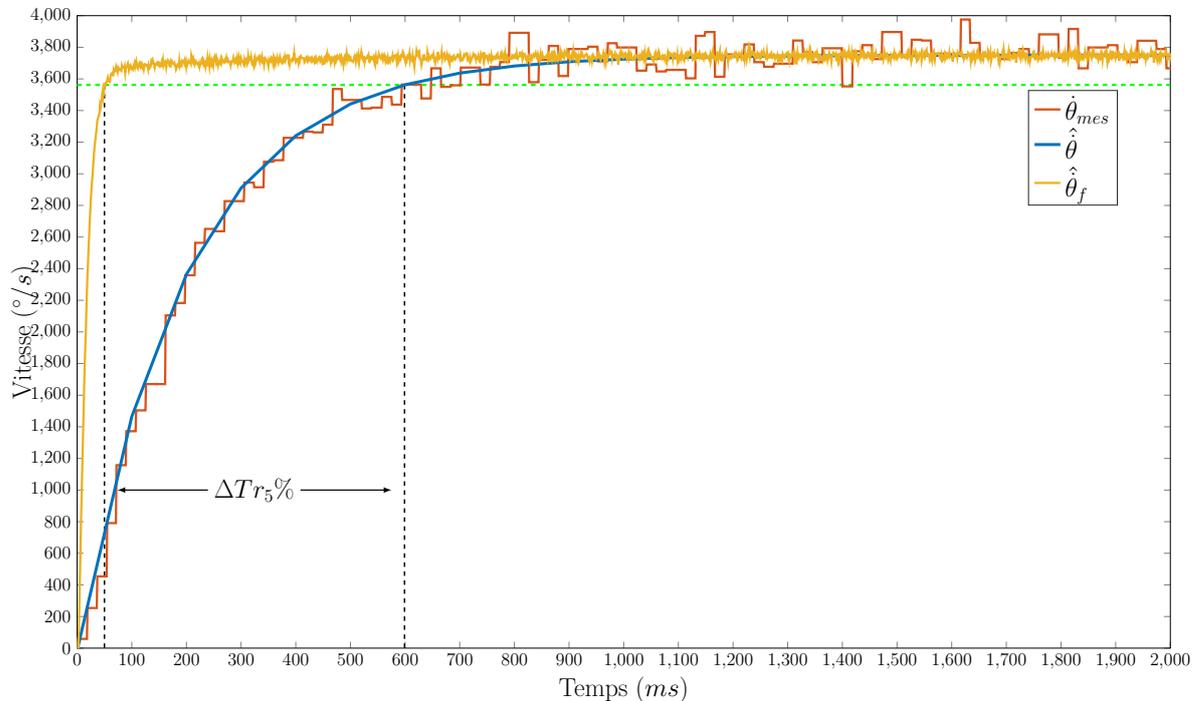


FIGURE 2.37 – Réponse à un échelon de vent de $10m/s$ enregistré en soufflerie pour le moulinet imprimé avec des godets coniques (cf. annexe B). Son temps de réponse est de $0,2s$. La ligne horizontale en pointillés représente la réponse à 95%. Le moulinet atteint 95% de sa valeur finale en $599ms$, alors que $\hat{\theta}_f$, l'estimation faite par le filtre de Kalman, atteint ce seuil en seulement $50ms$, soit 9% du temps de convergence normalement nécessaire lorsque le traitement du signal n'est pas appliqué.

Bien que les performances de cette implantation soient très intéressantes, la mise en application n'est pas satisfaisante puisque la performance du filtre est dépendante de la précision sur l'estimation de τ_a . Or, comme vu dans la section 2.3, la constante de temps de l'anémomètre est fonction de $\hat{\theta}_f$, la vitesse du vent que l'on cherche à estimer, (cf. équation (2.35)).

Il faut donc trouver une autre approche, permettant de caractériser le comportement du moulinet indépendamment de la vitesse et de la direction du vent mesuré.

2.6.3.3 Via le point de vue de couple :

Cette technique aborde la dynamique du rotor du point de vue du couple dans sa globalité. Une première approche décrivant cette méthode a été décrite dans l'article [Hayashi, 1987] mais se limite à une application linéaire, sans intégration dans un filtre prédictif.

Le fait de caractériser le moulinet d'un point de vue global, permet de s'abstenir de l'influence de l'angle d'incidence du vent apparent sur les godets, mais doit en contrepartie différencier les phases d'accélération et de décélération.

2.6.3.3.1 Théorie En phase d'accélération, le moment des efforts aérodynamiques sur l'ensemble de l'anémomètre est repris d'après l'équation (2.15), définie en section 2.3. Puis, simplifiée en étant redéfinie d'après le coefficient du couple d'accélération C_a , [Schrenk, 1929] :

$$\mathcal{M}_A = \frac{1}{2} C_a \rho S N R_r V_f^2 \quad (2.116)$$

Avec C_a le coefficient du couple d'accélération, fonction du coefficient anémométrique et de la vitesse relative du rotor par rapport à V_f , la vitesse indiquée par l'anémomètre en régime établi.

$$C_a = C_r \left[1 - K^2 \left(\frac{\dot{\theta} R_r}{V_f} \right)^2 \right] \quad (2.117)$$

Avec C_r le couple de frottement statique dû au roulements.

Alors, d'après (2.117) et $V_{mes} = K \dot{\theta} R_r$, (2.116) devient :

$$\mathcal{M}_A = \frac{1}{2} C_r \rho S N R_r (V_f^2 - V_{mes}^2) \quad (2.118)$$

Puis, en injectant l'expression de \mathcal{M}_A dans l'équation différentielle du mouvement $I \frac{d\dot{\theta}}{dt} = \mathcal{M}$, l'équation du mouvement en phase d'accélération devient :

$$\frac{dV_{mes}}{dt} = C_A (V_f^2 - V_{mes}^2) \quad (2.119)$$

Où :

$$C_A = \frac{C_r K \rho S N R_r^2}{2I} \quad (2.120)$$

Contrairement aux deux premières approches, l'équation différentielle (2.119) n'est fonction, mise à part la densité de l'air, que de caractéristiques liées à la mécanique de l'anémomètre. Il est donc possible de l'utiliser en faisant abstraction de la vitesse et de la direction du vent recherché.

Le même raisonnement conduit à l'expression de l'équation du mouvement en phase de décélération, C_A étant remplacé par C_D dans l'équation (2.119).

Connaissant les valeurs de C_A et C_D , la vitesse du vent mesurée peut être corrigée d'après l'équation du mouvement. Celle-ci peut être réécrite en faisant apparaître la vitesse

finale en fonction de celle mesurée :

$$V_f = \sqrt{V_{mes}^2 + \frac{1}{C_i} \frac{dV_{mes}}{dt}} \quad (2.121)$$

Avec C_i valant C_A ou C_D suivant le signe de $\frac{dV_{mes}}{dt}$.

Pour mettre en application cette technique, il faut connaître les valeurs des coefficients C_i , spécifiques à l'anémomètre considéré.

2.6.3.3.2 Évaluation expérimentale de C_A & C_D Bien que la relation (2.120) et la suivante permettent d'estimer les valeurs de C_A & C_D , il est plus précis de déterminer leur valeur expérimentalement. [Sanuki, 1952] définit le coefficient du couple de décélération d'après :

$$C_d = C_r \left[\left(\frac{V_f}{\theta R_r} \right)^2 - K^2 \right] \quad (2.122)$$

Alors, comme pour C_A , C_D est défini d'après la relation suivante :

$$C_D = \frac{C_r K \rho S N R_r^2}{2I} \quad (2.123)$$

Cependant, nous allons voir que la méthode expérimentale fournit des valeurs différentes pour C_A & C_D . Ces valeurs peuvent être déduites de la réponse d'un anémomètre à un échelon de vent, positif pour C_A et négatif pour C_D .

Pour un échelon positif : l'équation différentielle (2.119) a pour solution :

$$V_{mes} = \frac{-2V_f e^{-2C_A V_f t}}{1 + e^{-2C_A V_f t}} \quad (2.124)$$

Ce qui permet d'isoler C_A de V_f et V_{mes} via la relation :

$$\ln \left(\frac{V_f - V_{mes}}{V_f + V_{mes}} \right) = -2C_A V_f t \quad (2.125)$$

Alors, en traçant la variation de $\ln \left(\frac{V_f - V_{mes}}{V_f + V_{mes}} \right)$ en fonction du temps, il est possible de déterminer C_A . La régression effectuée sur la Figure (2.38) permet de poser la relation suivante :

$$-2C_A V_f = -9,1 \quad (2.126)$$

Avec pour application numérique $V_f = 10m/s$, ce qui donne $C_A = 0,455$.

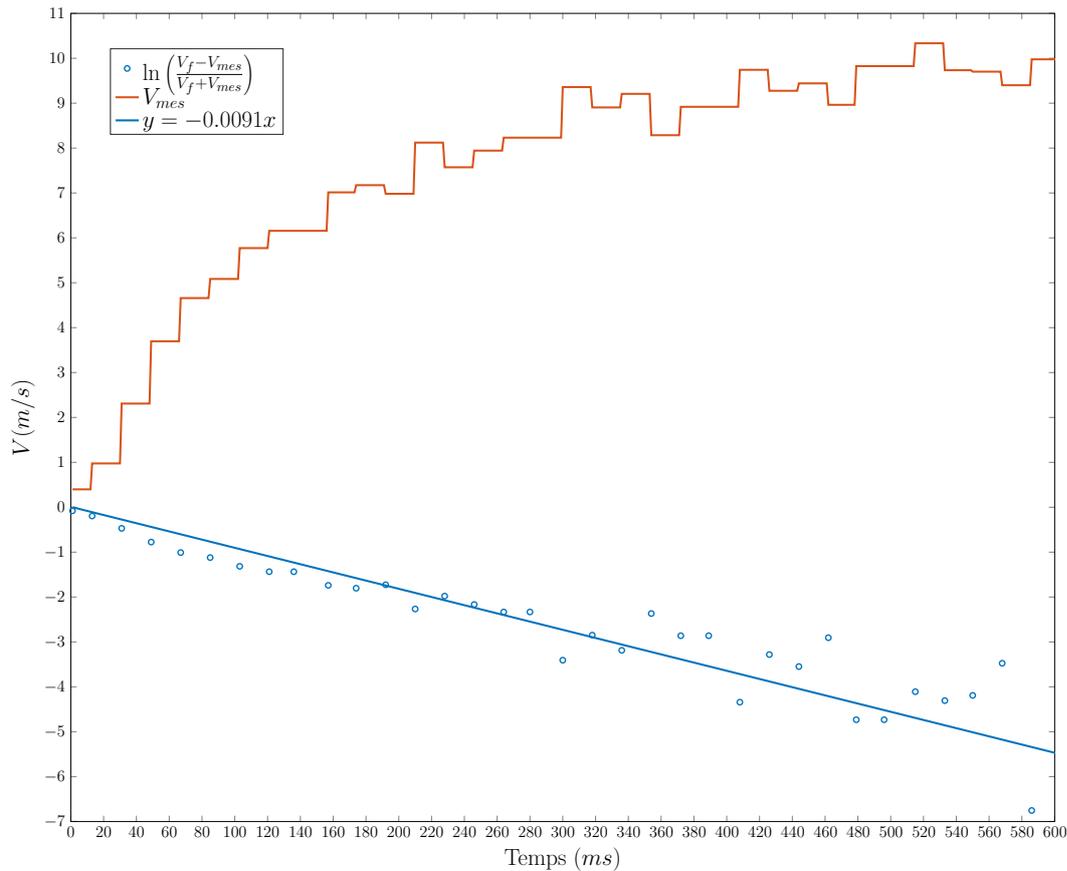


FIGURE 2.38 – Réponse à un échelon de 10m/s enregistré en soufflerie, pour l’anémomètre nke. La régression linéaire sur $\ln\left(\frac{V_f - V_{mes}}{V_f + V_{mes}}\right)$ permet de retrouver C_A .

Pour un échelon négatif : l’équation différentielle (2.119) a pour solution :

$$V_{mes} = \frac{V_0}{C_D V_0 + 1} \quad (2.127)$$

Ce qui conduit à la relation :

$$\frac{1}{V_0} - \frac{1}{V_{mes}} = -C_D t \quad (2.128)$$

Alors, comme pour C_A , la relation $\frac{1}{V_0} - \frac{1}{V_{mes}}$ permet de déterminer C_D , avec V_0 , la vitesse initiale avant l’échelon négatif. Les essais expérimentaux, dont l’un est présenté sur la Figure (2.39), donnent $C_D = 0,294$. Soit $1,54\times$ moins que C_A . Ce qui est cohérent avec le phénomène d’overspeed : pour la même amplitude de perturbation, l’anémomètre accélère plus fort qu’il ne décélère.

Ainsi, grâce à la relation (2.121) et aux coefficients constants C_A & C_D , il est possible d’estimer la valeur réelle du vent lorsque le moulinet est en régime transitoire et ce, indé-

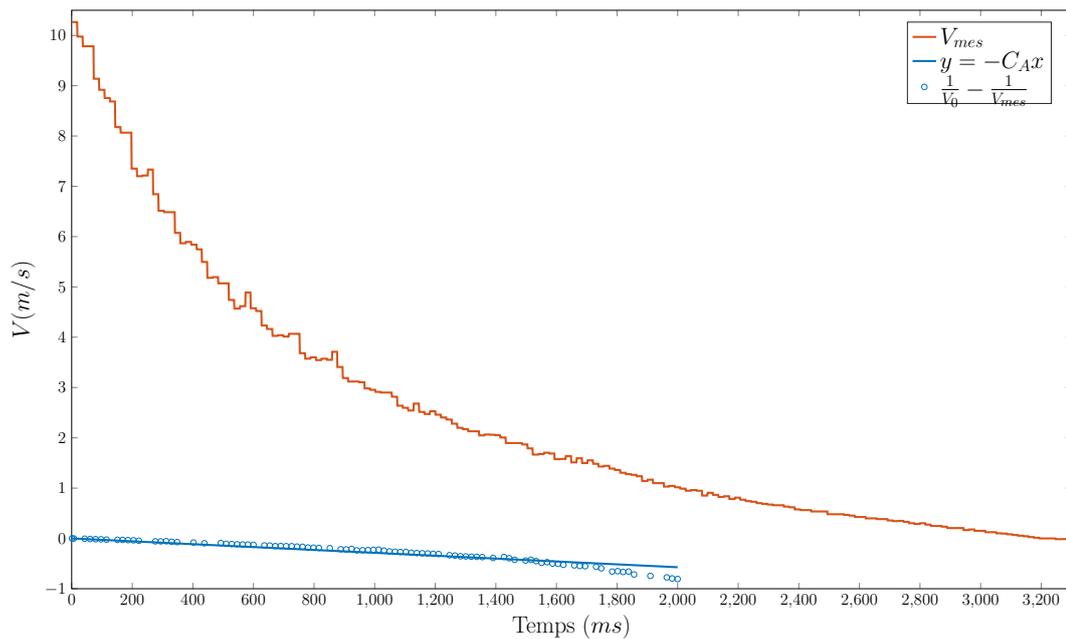


FIGURE 2.39 – Réponse à un échelon négatif de $V_0 = 10, 3m/s$, pour l'anémomètre nke. La régression linéaire sur $\frac{1}{V_0} - \frac{1}{V_{mes}}$ permet de retrouver C_D .

pendamment de la vitesse et de la direction du vent recherché. Cependant, comme c'est une estimation, il est préférable de l'intégrer dans un filtre de Kalman, de façon à prendre en compte les bruits de modèle et de mesure. De cette manière, l'estimation sera plus propre.

2.6.3.3.3 Implantation dans un filtre de Kalman L'objectif est d'intégrer le comportement décrit par l'équation (2.121) dans un filtre de Kalman.

Contrairement à la première implémentation décrite pour la girouette, cette équation différentielle n'est pas linéaire. Il faut donc adapter l'algorithme pour qu'il puisse tenir compte de cette non linéarité.

La méthode choisie repose sur le filtre de Kalman Étendu (EKF). Ce filtre permet de linéariser localement le problème, puis d'appliquer les équations du filtre de Kalman classique.

Équations Les équations d'état qui caractérisent l'évolution du système, (2.81) & (2.82) ne peuvent plus être écrites sous formes matricielles, elles sont remplacées par les suivantes :

$$\begin{cases} X_{k+1} = f(X_k) \\ y_k = h(X_k, v_k) \end{cases} \quad (2.129)$$

f décrivant la transition d'un état à l'instant k au suivant, et h , la relation entre la mesure et le vecteur d'état.

Prédiction : L'étape de prédiction devient :

$$\hat{X}_{k|k-1} = f(X_k) \quad (2.130)$$

$$P_{k|k-1} = J_k P_{k-1|k-1} J_k^T + Q_k \quad (2.131)$$

Mise à jour : Seule la mise à jour de l'estimation est modifiée par rapport au filtre dans sa version classique :

$$\hat{X}_{k|k} = \hat{X}_{k|k-1} + K_k (y_k - h(\hat{X}_{k|k-1}, v_k)) \quad (2.132)$$

Mise en application : Soit, $X = \begin{bmatrix} \hat{V}_f \\ \hat{V}_{mes} \\ \hat{V}_{mes} \end{bmatrix}$, l'information fournie par l'anémomètre

étant V_{mes} , et V_f la vitesse du vent finale. La matrice d'observation est alors équivalente à $H = [0 \ 1 \ 0]$. Elle est donc linéaire. Le problème de linéarisation se pose pour cet exemple, uniquement pour la matrice de transition F .

Il faut alors linéariser localement F . Cette linéarisation est effectuée à partir de ses dérivées partielles. On obtient alors sa Jacobienne :

$$J_{k+1} = \left. \frac{\partial f}{\partial X_{k+1}} \right|_{\hat{X}_k} \quad (2.133)$$

Déterminée à l'aide de $f(X_k)$:

$$f = \begin{cases} \hat{V}_f(k+1) = \hat{V}_f(k) \\ \hat{V}_{mes}(k+1) = \hat{V}_{mes}(k) + t \hat{V}_{mes}(k) \\ \hat{V}_{mes}(k+1) = C_i (\hat{V}_f^2(k) - \hat{V}_{mes}^2(k)) \end{cases} \quad (2.134)$$

On obtient la Jacobienne suivante :

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial \hat{V}_f}{\partial \hat{V}_f} & \frac{\partial \hat{V}_f}{\partial \hat{V}_{mes}} & \frac{\partial \hat{V}_f}{\partial \hat{V}_{mes}} \\ \frac{\partial \hat{V}_{mes}}{\partial \hat{V}_f} & \frac{\partial \hat{V}_{mes}}{\partial \hat{V}_{mes}} & \frac{\partial \hat{V}_{mes}}{\partial \hat{V}_{mes}} \\ \frac{\partial \hat{V}_{mes}}{\partial \hat{V}_f} & \frac{\partial \hat{V}_{mes}}{\partial \hat{V}_{mes}} & \frac{\partial \hat{V}_{mes}}{\partial \hat{V}_{mes}} \\ \frac{\partial \hat{V}_{mes}}{\partial \hat{V}_f} & \frac{\partial \hat{V}_{mes}}{\partial \hat{V}_{mes}} & \frac{\partial \hat{V}_{mes}}{\partial \hat{V}_{mes}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & t \\ 2C_i \hat{V}_f & -2C_i \hat{V}_{mes} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.135)$$

Cette Jacobienne est d'une complexité limitée mais doit être recalculée à chaque itération.

Toutefois, la technique de linéarisation appliquée est locale, ce qui entraîne une convergence locale du filtre de Kalman étendu. Il ne garantit donc pas une convergence globale, contrairement au filtre de Kalman classique. Sa stabilité dépend alors grandement de la qualité de son initialisation. Cette étape est effectuée à l'aide des équations (2.119) & (2.121).

La matrice de bruit de modèle Q_k , est construite de la même manière que (2.109). C'est-à-dire à partir de J et des écarts types du bruit de modèle : ε_{V_f} , $\varepsilon_{V_{mes}}$, $\varepsilon_{\dot{V}_{mes}}$:

$$Q_k = \begin{bmatrix} \varepsilon_{V_f}^2 & 0 & 2C_i\varepsilon_{V_f}^2\hat{X}_k(1) \\ 0 & \varepsilon_{V_{mes}} + \varepsilon_{\dot{V}_{mes}}t^2 & -2C_i\varepsilon_{V_{mes}}\hat{X}_k(2) \\ 2C_i\varepsilon_{V_f}^2\hat{X}_k(1) & -2C_i\varepsilon_{V_{mes}}\hat{X}_k(2) & 4C_i^2(\varepsilon_{V_f}^2\hat{X}_k(1)^2 + \varepsilon_{V_f}^2\hat{X}_k(2)^2) \end{bmatrix} \quad (2.136)$$

Contrairement à celle utilisée pour le filtre linéaire (2.111), cette matrice de bruit de modèle fait apparaître les estimations $\hat{X}_k(1)$ & $\hat{X}_k(2)$. Il faut donc la recalculer à chaque itération.

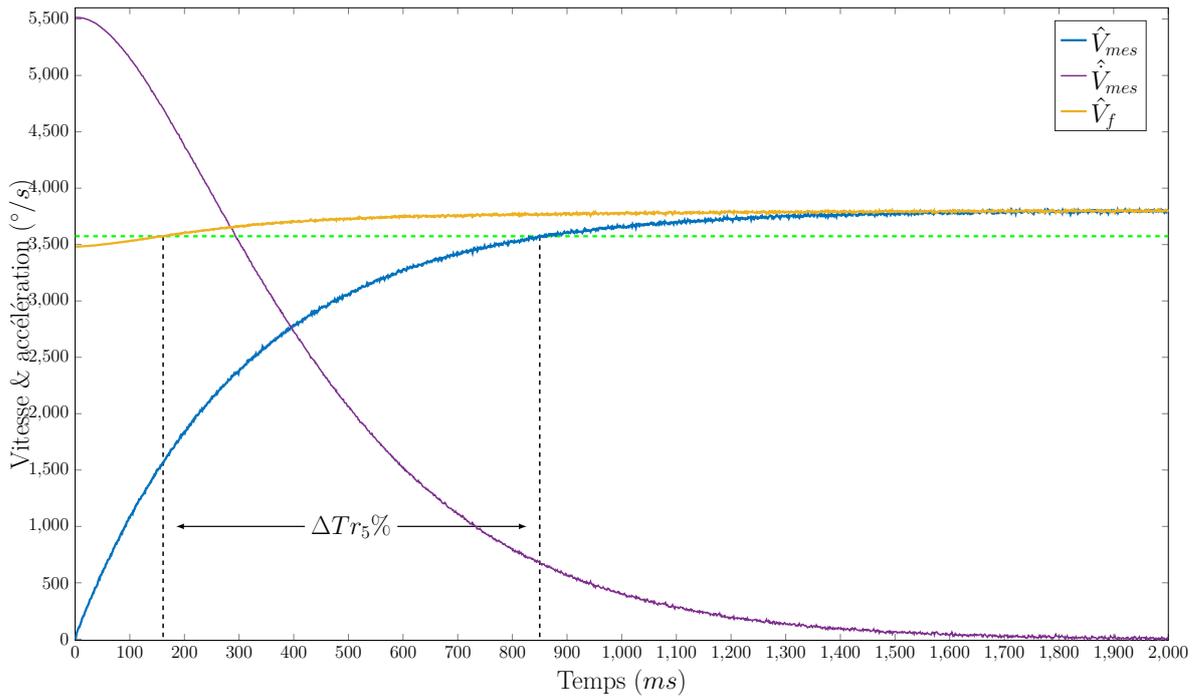


FIGURE 2.40 – Réponse à un échelon de vent de 10m/s pour l'ancien moulinet nke ayant pour constante de temps $\tau_a(10\text{m/s}) = 0,28\text{s}$. La ligne horizontale représente la réponse à 95%. Le moulinet atteint 95% de sa valeur finale en 850ms , alors que \hat{V}_f , l'estimation faite par le filtre de Kalman, atteint ce seuil en seulement 161ms . Soit 20% du temps de convergence normalement nécessaire lorsque le traitement du signal n'est pas appliqué.

La Figure (2.40) représente le résultat obtenu par l'application de ce filtre de Kalman étendu lorsque l'anémomètre est soumis à un échelon positif de 10m/s . Le filtre est initialisé

pour \hat{V}_f par la relation $\sqrt{V_{mes}^2 + \frac{\dot{V}_{mes}}{C_i}}$. Le temps de réponse du signal utile est alors 5 fois inférieur au temps nécessaire au moulinet pour qu'il atteigne 95% de sa vitesse de rotation en régime établi.

2.7 Conclusion

La première section de ce chapitre a permis d'étudier toutes les technologies permettant de mesurer le vent. Ce travail s'est conclu sur la décision de continuer à utiliser un capteur anémométrique "traditionnel", bien que ses performances dynamiques soient en deçà des capteurs basés sur la technologie ultrasonique. Ce choix a été motivé d'une part par la robustesse éprouvée de ce type de capteur et d'autre part par la maîtrise de son coût de fabrication. Tout cela en émettant l'hypothèse que son déficit de performance, dû à ses parties mobiles, peut être corrigé par un travail d'optimisation et de traitement du signal. Ces travaux d'amélioration sont l'objet du reste de ce chapitre et ont contribué à l'amélioration de la performance globale grâce à deux approches complémentaires, détaillées ci-dessous :

La première étape d'optimisation s'est concentrée sur la recherche de la forme optimale des senseurs, qui était jusqu'à présent effectuée de manière empirique. Cette optimisation, obtenue à l'aide d'outils de recherche opérationnelle, a non seulement permis de diviser le temps de réponse de la girouette par 2, mais aussi de définir la forme optimale pour chaque bateau et pour chaque programme de navigation par la création d'un outil spécifique.

Cette étape d'optimisation du design a nécessité au préalable le développement et la validation d'un modèle mathématique, décrivant le comportement dynamique des parties mobiles des capteurs. Ces équations mathématiques ont ensuite pu être réutilisées lors de l'étape de traitement du signal.

La dernière section de ce chapitre est consacrée à l'amélioration de la réactivité et de la précision des informations fournies par l'aérien, en travaillant sur le signal numérisé. Ces travaux de traitement du signal se sont appuyés sur le filtre prédictif de Kalman. Ce filtre permet d'intégrer les équations décrivant la dynamique des capteurs précédemment développées. Grâce à sa capacité de prédiction, il apporte une amélioration très significative du signal utile. Le temps de réponse de la girouette a ainsi été divisé par 6, et celui de l'anémomètre par 5. La Figure (2.41) reprend les performances physiques des pales originales et optimisées, en y rajoutant le gain de performance supplémentaire, obtenu via le traitement du signal. Le temps de réponse du signal utile de la girouette est alors 12 fois plus faible qu'au début de cette étude. Ces gains de performances sont résumés sur la Figure (2.42) et leur variations sont exprimées en pourcentage par rapport au design de référence.

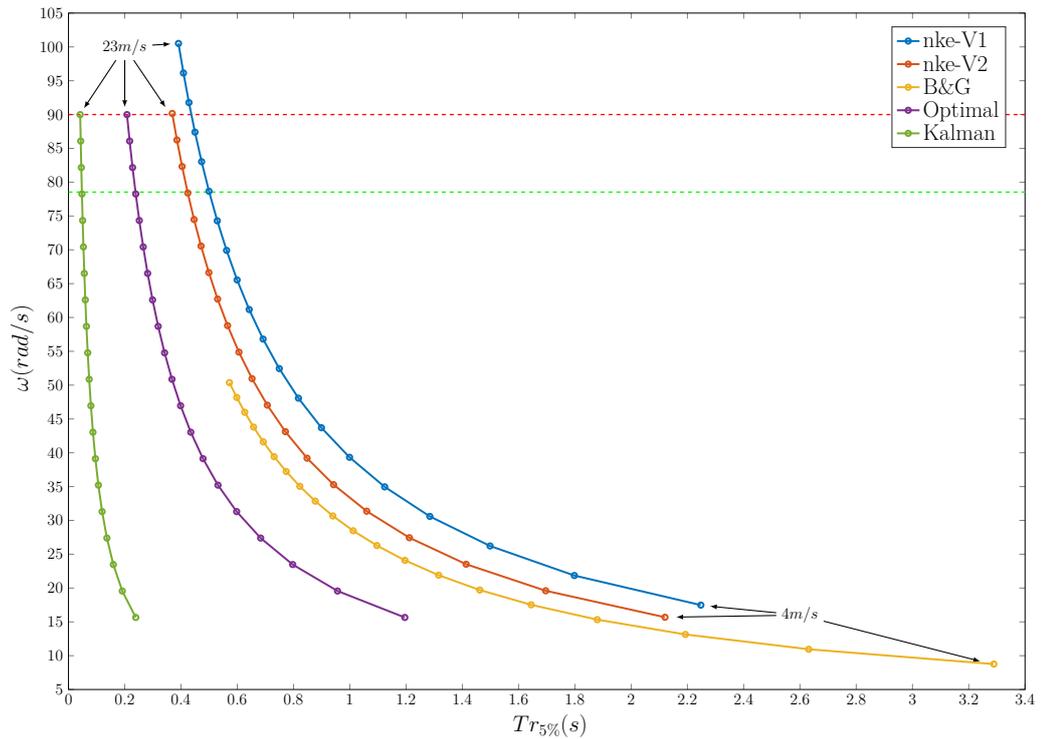


FIGURE 2.41 – Reprise de la Figure (2.30) caractérisant les performances des pales en ajoutant le résultat obtenu lorsque le traitement du signal est appliqué, cf. courbe "Kalman". Le temps de réponse du signal issu du filtre de Kalman est 12 fois plus faible que celui renvoyé par la pale "nke-V1", en usage au début de cette étude.

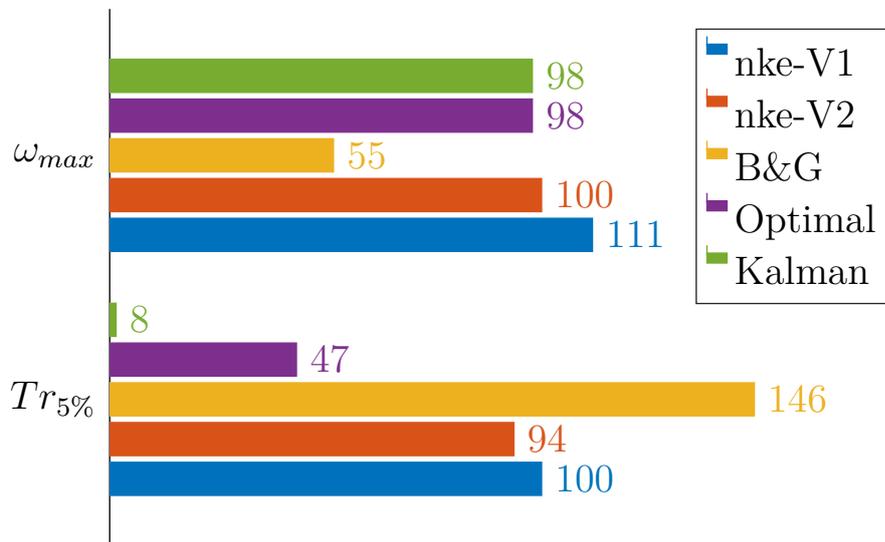


FIGURE 2.42 – Résumé des gains obtenus en pourcentage par rapport au design "nke-V1" et du positionnement par rapport à la pulsation max à ne pas dépasser sous peine de casse.

Ce chapitre ne comporte pas de partie sur la redéfinition de la forme optimale des godets car les résultats des évaluations des formes possibles en soufflerie, cf. annexe B, ont montré

que le type de forme actuellement utilisé possède le meilleur temps de réponse. Nous avons alors fait l'hypothèse que les gains éventuellement envisageables seraient alors faibles. De plus, contrairement à la forme des pales des girouettes qui sont découpées à l'aide d'une machine CNC, les moulinets sont fabriqués par injection dans des moules, ce qui implique un coût de modification de la forme du moulinet élevé. Alors, au vu du gain de réactivité apporté par le traitement du signal (-80% sur τ_a), nous avons fait le choix de ne pas toucher au design actuel.

Toutes ces améliorations profitent directement à la mesure du vent apparent mais également à toutes les données qui utilisent ce vent apparent comme source d'information. Nous verrons dans le chapitre suivant comment ces algorithmes de reconstruction du vent réel tirent partie des améliorations obtenues sur le vent apparent.

La reconstruction du vent réel

Sommaire

3.1	Introduction	135
3.2	Définitions et Normes	135
3.2.1	Moyenne de la vitesse et de la direction du vent	135
3.2.1.1	Moyenne vectorielle	135
3.2.1.2	Moyenne arithmétique	136
3.2.1.3	Les autres types de moyennes	138
3.2.1.3.1	Moyenne quadratique	138
3.2.1.3.2	Moyenne harmonique	138
3.2.2	Autres métriques caractérisant le vent	139
3.2.2.1	Décomposition de la vitesse instantanée du vent	139
3.2.2.2	Écart Type	139
3.2.2.3	Turbulence	140
3.2.2.4	Rafale	141
3.2.2.5	Autres statistiques	142
3.2.2.5.1	Skewness	142
3.2.2.5.2	Kurtosis	143
3.2.2.5.3	Diagramme BET	144
3.2.2.5.4	Direction moyenne pondérée	144
3.3	Phénomènes perturbateurs	147
3.3.1	Wind Shear	147
3.3.1.1	Introduction	147
3.3.1.2	Gradient de Vitesse	147
3.3.1.2.1	Longueur de rugosité	148
3.3.1.2.2	Exemples de gradients de vitesse en fonction de V_{ref}	149

3.3.1.2.3	Correction du fetch	149
3.3.1.2.4	Stabilité en température	150
3.3.1.3	Gradient de direction	151
3.3.1.4	Cisaillement du vent apparent	151
3.3.2	"Poids de l'air"	153
3.3.2.1	Introduction	153
3.3.2.2	Masse volumique de l'air humide	153
3.3.2.3	Répercussions sur la force transmise aux voiles	154
3.3.2.4	Énergie transportée par le vent réel	156
3.3.2.5	Conclusion	159
3.3.3	Estimation de l'upwash	159
3.3.4	État de la mer	160
3.4	Chaîne de reconstruction du vent réel	163
3.4.1	Méthodologie usuelle	164
3.4.1.1	Chaîne de reconstruction	164
3.4.1.2	Débruitage	164
3.4.1.3	Tables de vent réel et Shear	165
3.4.1.4	Rétro-calcul du vent apparent	165
3.4.1.5	Correction de la direction du vent réel durant le virement	166
3.4.2	Chronologie du passage du vent météo au signal fourni par l'aérien	167
3.4.2.1	A : Changement d'altitude	167
3.4.2.2	B : Passage en repère surface	168
3.4.2.3	C : Vitesse du bateau	168
3.4.2.4	D : Mouvements & attitude du bateau	168
3.4.2.5	E : Upwash	168
3.4.2.6	F : Vrillage & offsets	169
3.4.2.7	G : Fonction de transfert du capteur	169
3.4.3	Détail de la chaîne de reconstruction	169
3.4.3.1	1 : Traitement du signal prédictif	170
3.4.3.2	2 : Offsets et vrillage	170
3.4.3.3	3 : Correction de l'upwash	170
3.4.3.4	4 : Débruitage dynamique	170
3.4.3.5	5 : Débruitage statique	170
3.4.3.6	6a : Vent réel surface	171
3.4.3.7	7a : Vent référence surface	171
3.4.3.8	6b : Vent réel fond	171
3.4.3.9	7b : Vent météo	171
3.4.4	Conclusion	171
3.5	Conclusion	172

3.1 Introduction

Ce 3^{ème} chapitre s'intéresse à la reconstruction du vent réel, en commençant par poser les définitions et normes employées. Nous détaillerons ensuite les phénomènes liés au vent réel qui influent sur son estimation, tout en proposant des solutions adaptées pour les prendre en compte. Enfin, nous nous intéresserons à la chaîne de reconstruction du vent réel, tout d'abord en expliquant pourquoi les méthodes actuelles ne sont pas satisfaisantes, puis en proposant une nouvelle méthodologie.

3.2 Définitions et Normes

Pour pouvoir comparer plusieurs signaux entre eux, il faut au préalable définir quelles sont les métriques qui vont servir d'éléments de comparaison. C'est ce que nous allons faire dans cette section. Bien que les éléments que nous allons parcourir sont couramment employés en statistique, nous allons voir que les appliquer au vent nécessite de prendre des précautions. Ce qui n'est bien souvent pas le cas dans les centrales de navigation. Puis, nous normaliserons les concepts associés au vent qui influent sur la définition de la performance, car bien souvent, ils ne sont pas définis de la même manière entre deux centrales de navigation similaires.

3.2.1 Moyenne de la vitesse et de la direction du vent

Lorsque l'on s'intéresse à la moyenne ou aux statistiques sur le vent, il faut prendre en compte deux particularités liées à la définition du vent. La première est la définition vectorielle du vent : la définition de sa moyenne n'est pas triviale. La seconde caractéristique particulière du vent est que sa direction est représentée sous forme circulaire. Il y a donc une discontinuité entre la direction 359° et le 0°. Il faut donc prendre en compte les problèmes de statistiques directionnelles liés à cette représentation, [Downs, 1972].

Il est possible de calculer les valeurs moyennes de la vitesse et de la direction du vent suivant deux approches : vectorielle ou scalaire.

3.2.1.1 Moyenne vectorielle

C'est une véritable moyenne vectorielle : les moyennes de vitesse et de direction sont obtenues à partir du vecteur moyen, construit par l'addition vectorielle des données vent sur la période d'échantillonnage.

Soit V_i et Θ_i la vitesse et la direction du vent pour l'échantillon i . Alors, les composantes

vers l'Est et le Nord peuvent être notées x et y . Ainsi, pour un nombre d'observations n , la moyenne arithmétique pondérée de V_x et V_y est définie selon :

$$\langle V_x \rangle_p = -\frac{\sum_{i=1}^n V_i \sin \Theta_i}{n} \quad (3.1)$$

$$\langle V_y \rangle_p = -\frac{\sum_{i=1}^n V_i \cos \Theta_i}{n} \quad (3.2)$$

Alors, la norme du vecteur moyen \bar{V}_v et la direction du vecteur moyen $\bar{\Theta}_v$ peuvent être obtenues d'après les relations suivantes :

$$\bar{V}_v = \sqrt{\langle V_x \rangle_p^2 + \langle V_y \rangle_p^2} \quad (3.3)$$

$$\bar{\Theta}_v = \arctan \frac{\langle V_x \rangle_p}{\langle V_y \rangle_p} \quad (3.4)$$

\bar{V}_v & $\bar{\Theta}_v$ représentent alors l'équivalent d'un vecteur moyen durant la période d'échantillonnage.

La deuxième façon de moyenner le vent est de travailler indépendamment sur les valeurs de vitesse et de direction.

3.2.1.2 Moyenne arithmétique

C'est la moyenne scalaire utilisée couramment :

$$\langle \Theta \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Theta_i \quad (3.5)$$

$$\langle V \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \quad (3.6)$$

Cependant, du fait de la discontinuité de la direction autour du zéro, $\langle \Theta \rangle$ ne peut pas être obtenue directement à partir des valeurs brutes. La méthode utilisée couramment et décrite par [Mardia, 1975] est la suivante :

$$\bar{\Theta} = \arctan \frac{\langle V_x \rangle}{\langle V_y \rangle} \quad (3.7)$$

Elle reprend le principe de décomposition trigonométrique de la moyenne vectorielle mais en transposant la norme sur le cercle unitaire. Avec $\langle V_x \rangle$ et $\langle V_y \rangle$ construits sur le même principe

que (3.1) & (3.2) mais sans la pondération par la vitesse.

$$\langle V_x \rangle = -\frac{\sum_{i=1}^n \sin \Theta_i}{n} \quad (3.8)$$

$$\langle V_y \rangle = -\frac{\sum_{i=1}^n \cos \Theta_i}{n} \quad (3.9)$$

Les directions et vitesses obtenues avec ces deux méthodes ne sont pas identiques. Deux exemples sont donnés sur la Figure (3.1). La moyenne arithmétique de la vitesse est toujours plus faible que la moyenne obtenue par l'addition vectorielle, [Gilhousen, 1987].

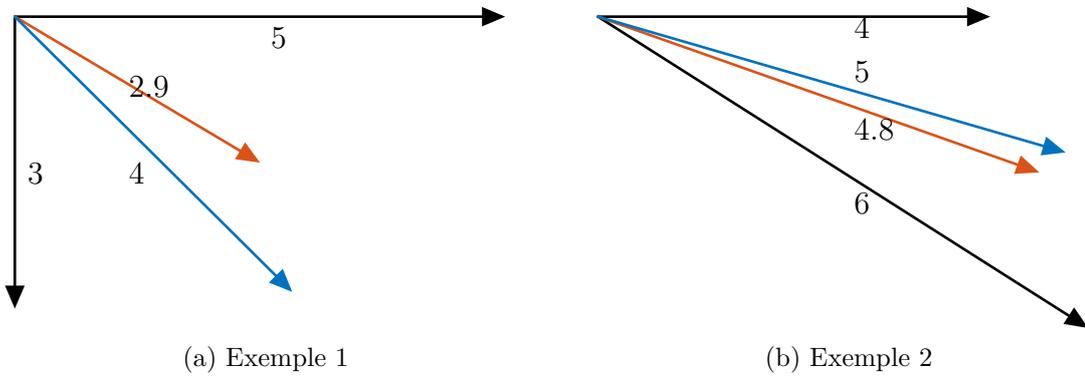


FIGURE 3.1 – Comparaison des moyennes par méthode arithmétique en bleu et vectorielle en orange. Les deux vecteurs à moyenner sont en noir.

Cependant, bien que numérisé, le vent est à l'origine une quantité continue. Il est donc préférable de traiter la direction et la vitesse comme des scalaires. En effet, si la moyenne vectorielle est adaptée à l'estime (pour le suivi d'un homme à la mer par exemple), elle ne l'est pas pour représenter le vent moyen subit par un bateau.

Prenons l'exemple de deux rafales successives de directions opposées : la moyenne vectorielle donne un vent nul, alors que le bateau a bien subi les rafales. Il est donc préférable de travailler avec la moyenne arithmétique. Mitsuta a reporté dans [Mori, 1986], que le problème de discontinuité pour la détermination de la moyenne arithmétique de la direction du vent peut être résolu à l'aide de l'équation suivante, en assumant que l'échantillonnage soit suffisamment rapide pour que les changements de direction soient inférieurs à 180° entre deux valeurs successives. Alors (3.6) devient :

$$\langle \Theta \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_i \quad (3.10)$$

Avec :

$$\theta_i = \Theta_i \text{ pour } n = 1$$

$$\delta_i = \Theta_i - \theta_{i-1}$$

$$\theta_i = \Theta_i + \delta_i + 360 \text{ pour } \delta_i < -180$$

$$\theta_i = \Theta_i + \delta_i \quad \text{pour } |\delta_i| < 180$$

$$\theta_i = \Theta_i + \delta_i - 360 \quad \text{pour } \delta_i > 180$$

C'est la technique que l'on utilise chez nke, mis à part le fait que l'on s'affranchit du stockage de la série de valeurs, en utilisant une moyenne exponentielle. Cette même technique simplificatrice peut être utilisée pour calculer l'écart type de la direction en une passe [Finch, 2009].

3.2.1.3 Les autres types de moyennes

Nous avons vu dans le paragraphe précédent qu'il existe plusieurs définitions de la moyenne. En voici d'autres qui permettent d'être plus représentatif que la donnée moyennée.

3.2.1.3.1 Moyenne quadratique La moyenne quadratique est la racine carrée de la moyenne arithmétique des carrés des valeurs à moyenner. Souvent notée *rms* pour Root Mean Square :

$$\bar{V}_q = \sqrt{\langle V^2 \rangle} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n V_i^2}{n}} \quad (3.11)$$

Elle est généralement employée pour caractériser la puissance moyenne. Nous avons vu avec l'équation (1.2) que la force transmise par le vent au bateau est fonction de la vitesse du vent au carré. Il est donc judicieux de travailler avec la moyenne quadratique de la vitesse du vent quand on veut faire référence à l'énergie transmise au bateau, sur la période spécifiée. Par exemple, pour travailler sur la performance, ou bien dans le cadre du mode rafale du pilote automatique qui déclenche une manœuvre de sécurité quand le vent augmente (cf. section 4.2).

3.2.1.3.2 Moyenne harmonique C'est l'inverse de la moyenne arithmétique de l'inverse des termes :

$$\bar{X}_h = \frac{1}{\langle X \rangle} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{X_i}} \quad (3.12)$$

Si deux distances identiques sont parcourues à des vitesses différentes, alors la vitesse équivalente qui permet de parcourir la totalité du trajet dans un temps identique est obtenue avec la moyenne harmonique.

C'est cette moyenne qu'il faut employer lorsque l'on travaille avec la *GeoSpeed*, qui est une variable de performance, permettant d'estimer la vitesse du bateau pour une distance de référence sur le fond. On l'utilisera pour qualifier la performance du pilote automatique ou bien la comparer à un barreur humain. Ou encore, lorsque l'on analyse des variables en post-traitement, extraites à partir des segments de parcours.

Le terme moyenne est donc un élément que l'on emploie facilement, mais lorsqu'il est mis en application, il faut faire attention à la nature de la variable et au type d'information que l'on veut moyenner. Intéressons-nous maintenant aux autres moyens permettant de caractériser le vent.

3.2.2 Autres métriques caractérisant le vent

La valeur moyenne est la statistique la plus facile à calculer et à appréhender. Elle n'est cependant pas suffisante pour caractériser la dynamique du vent. Nous allons voir dans la suite de cette section quelles sont les techniques complémentaires à la moyenne qu'il est possible de mettre en place.

3.2.2.1 Décomposition de la vitesse instantanée du vent

Dans la couche de surface, si l'on se place dans une période d'observation comprise en 10 minutes et 1 heure, alors le vent moyen garde une direction constante (Voir le spectre de densité de puissance de [Van der Hoven, 1957]).

En définissant le repère orthonormé $(O, \vec{u}, \vec{v}, \vec{w})$ avec l'origine O placée au sol, \vec{u} dans la direction moyenne du vent et \vec{w} orienté vers le haut. Alors, le vent réel $\vec{V}(z)$ à une hauteur z , peut se décomposer en une partie moyenne $\vec{V}(z)$ et une partie aléatoire $\vec{V}'(z)$ représentant la turbulence :

$$\vec{V}(t, z) = \vec{V}(z) + \vec{V}'(t, z) \quad \text{avec} \quad \vec{V}'(z) = \vec{0} \quad (3.13)$$

De cette décomposition du vent en une valeur moyenne accompagnée de parties aléatoires suivant les dimensions u, v & w , peuvent être définis d'autres métriques comme l'écart type.

3.2.2.2 Écart Type

L'écart type est le premier paramètre que l'on cherche à évaluer après la moyenne. L'écart type de la vitesse et de la direction du vent va être utile à différents types de réflexion. Par exemple, pour caractériser la stabilité du vent et l'amplitude des oscillations attendues, ce qui aidera le skipper lors de la phase de préparation de manche. C'est également une information cruciale pour l'analyse de performance : il est par exemple plus aisé pour le pilote automatique de tenir une consigne dans un vent stable que dans un vent avec un écart type important. L'une des premières métriques de la performance du pilote sera par exemple de comparer l'écart type de la direction du vent réel, par rapport à celui de l'erreur à la consigne.

Dans la couche de surface, les écarts types σ_i sont indépendants de la hauteur [Foye,

2001]. L'écart type considéré pour le vecteur vent est la moyenne quadratique des écarts types de ses composantes orthogonales :

$$\sigma_{\vec{v}} = \sqrt{\frac{1}{3}(\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2)} \quad (3.14)$$

Il est montré expérimentalement par [Flightl et Mcvebil, 1970], que les rapports entre la composante latérale et verticale, vis-à-vis de l'écart type longitudinal, vérifient les relations suivantes :

$$\sigma_v = 0.75\sigma_u \quad \text{et} \quad \sigma_w = 0.5\sigma_u \quad (3.15)$$

Et que d'après [Flay *et al.*, 1982], l'écart type selon la composante longitudinale et proportionnel à la vitesse de friction selon :

$$\sigma_u = \frac{V^*}{k} \quad (3.16)$$

On pourra alors se servir de cette relation pour vérifier la cohérence du gradient de vitesse estimé (cf. section 3.3.1).

Cependant, en pratique, on commencera par analyser l'écart type de la direction du vent réel plutôt que l'écart type de la vitesse. Calculer l'écart type d'un angle n'est pas évident, on utilisera alors la méthode proposée par [Yamartino, 1984] qui permet de le faire en une seule passe.

Le principe est de construire l'écart type à partir des deux variables (3.9) & (3.9) déjà calculées pour obtenir la moyenne. Alors, la fonction d'interpolation suivante assure d'obtenir σ_{Θ} avec une marge d'erreur inférieure à 2% [Weber, 1997] :

$$\sigma_{\Theta} = \frac{180}{\pi} \arcsin(\epsilon) (1 + b_{\epsilon} \epsilon^3) \quad (3.17)$$

Avec :

$$\epsilon_{\Theta} = \sqrt{1 - (\langle V_x \rangle^2 + \langle V_y \rangle^2)} \quad (3.18)$$

et

$$b_{\epsilon} = (2/\sqrt{3}) - 1 = 0.1547 \quad (3.19)$$

3.2.2.3 Turbulence

La turbulence est la variation de la vitesse autour de sa vitesse moyenne. Elle est considérée sur une période T par l'écart type de cette fluctuation (3.14).

Cependant, pour qualifier un vent on utilisera plus facilement le taux de turbulence, également

appelé intensité de la turbulence, défini d'après [Zhou et Kareem, 2002] comme étant l'écart type normalisé par la vitesse moyenne :

$$I_i(z) = \frac{\sigma_i}{\bar{V}(z)} \quad (3.20)$$

Alors, à partir de l'équation du gradient vertical (3.27) et de l'écart type (3.16), l'intensité de turbulence longitudinale peut être reliée à la longueur de rugosité par la relation suivante :

$$I_u(z) = \frac{1}{\ln(z/z_0)} \quad (3.21)$$

On préférera utiliser l'écart type sur la direction et l'intensité de la turbulence pour la vitesse du vent réel. Les variations de la vitesse du vent sont également couramment définies par la rafale.

3.2.2.4 Rafale

Une rafale de vent est définie comme étant une valeur significativement supérieure à la vitesse moyenne du vent. Nous verrons dans la section 4.2, dédiée à la prise en compte de ses rafales sur les actions du pilote automatique, que la limite qualifiant l'augmentation soudaine du vent en rafale, est dépendante de l'allure du bateau. Cependant, la période de référence utilisée pour définir l'intensité moyenne est identique à celle utilisée en météorologie, à savoir 10 minutes.

Nous avons vu que l'on peut décomposer le vent en une partie moyenne et une partie aléatoire. Alors, la vitesse de pointe \widehat{V} , définissant le maximum de vitesse rencontré sur une période de référence ΔT_{ref} , correspond à la valeur moyenne additionnée de l'amplitude maximale de la partie aléatoire :

$$\widehat{V}(z) = \bar{V}(z) + V'_{max}(z) \quad (3.22)$$

Cette vitesse de pointe peut être estimée connaissant l'intensité de turbulence (cf, equation (3.21)), par la relation suivante :

$$\widehat{V}(z) = \bar{V}(z) + g(\tau)\sigma_u = \bar{V}(z)(1 + g(\tau)I_u(z)) \quad (3.23)$$

Avec $g(\tau)$, le facteur de pointe pour la période τ . Lorsque la période de référence τ_{ref} utilisée pour déterminer l'intensité de turbulence est égale à 600 secondes alors g est défini d'après

le [CSTB, 1997] par la relation suivante :

$$g(\tau) = \sqrt{2 \ln \left(\frac{\tau_{ref}}{5\tau} \right)} \quad (3.24)$$

Cette relation est intéressante pour estimer à quelle intensité de rafales on peut s'attendre durant la période définie. En pratique, l'intensité de la partie aléatoire V' , utilisée par le pilote, est obtenue à partir de la différence entre la vitesse moyennée sur 3 secondes et celle de référence, moyennée sur 10 minutes.

Nous venons de faire la revue des statistiques les plus courantes. Voyons maintenant d'autres techniques plus avancées.

3.2.2.5 Autres statistiques

Si l'on cherche à caractériser plus en détail le vent et principalement ses changements de directions afin d'exploiter au mieux ses évolutions, il faut s'intéresser à d'autres métriques que l'écart type et la moyenne. Ce type d'analyse est surtout intéressant pour les navigations inshore, lorsque le vent est influencé par le relief. L'analyse du vent est souvent caractérisée par le compétiteur avec les termes suivants : la valeur moyenne, les butées, shifty si le vent est instable, la tendance (si la moyenne est évolutive) et si "les droites sont plus longues que les gauches". Toutes ces observations sont normalement intégrées dans la routine de préparation de la manche mais demandent beaucoup de savoir-faire et de concentration. Elles peuvent cependant être évaluées automatiquement et de façon constante par la centrale de navigation. Les indicateurs suivants sont assez courants, mais comme on souhaite les appliquer sur la direction du vent réel, il faut se référer aux techniques de statistiques circulaires. Pour cela, on se référera à l'un des livres référent dans ce domaine : [Mardia et Jupp, 1999].

3.2.2.5.1 Skewness Nous avons vu précédemment que le vent est une valeur continue, alors la distribution de la direction du vent ne sera pas pondérée par sa vitesse. Le Skewness est défini comme étant le moment centré d'ordre 3 normalisé par le cube de l'écart type. Plus simplement, c'est un outil courant permettant de caractériser la symétrie d'une distribution. Nous allons prendre comme exemple la distribution de la force de vent réel, car elle est naturellement dissymétrique :

Distribution de Weibull La Figure (3.2) représente la distribution de la vitesse du vent autour de sa valeur moyenne, en l'occurrence 10nds. La répartition de la vitesse du vent réel est modélisée par la distribution de Weibull. On remarque que cette distribution est fortement dissymétrique. Cette dissymétrie est quantifiée par une valeur de Skewness égale à

0.38. C'est une valeur sans dimension dont l'interprétation est détaillée dans le paragraphe suivant.

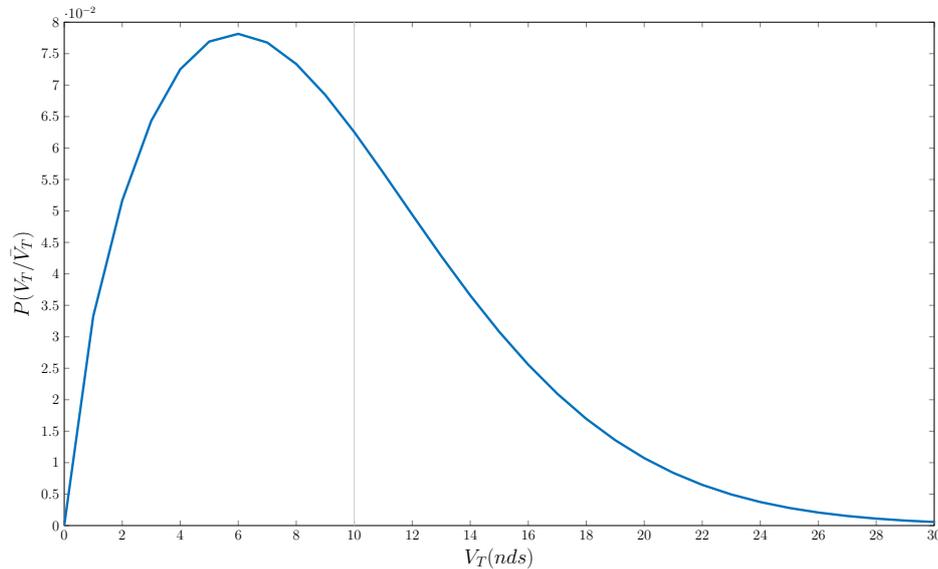


FIGURE 3.2 – Distribution de probabilité de la vitesse du vent réel pour une vitesse moyenne de 10nds et un facteur de forme de weibull de 1.7.

Interprétation pour la direction La valeur du Skewness doit être interprétée de la sorte :

- $\simeq 0$, la distribution est symétrique,
- > 0 , la distribution est asymétrique, avec la queue de droite supérieure à celle de gauche,
- < 0 , la distribution est asymétrique, avec la queue de gauche supérieure à celle de droite.

Appliquée à la distribution de la direction du vent réel, elle ne permet pas à elle seule de dire si le vent prend de la droite ou de la gauche, mais de dire que par exemple, si le Skewness est positif, alors, les rotations gauches durent plus longtemps et ont moins d'amplitude que les droites. On aura alors tendance à patienter en babord et exploiter rapidement les droites.

3.2.2.5.2 Kurtosis C'est le moment d'ordre 4 de la variable centrée réduite. Il caractérise l'aplatissement de la distribution : 0 correspondant à la loi normale. Il est de valeur positive lorsque la distribution est plus pointue et négative lorsqu'elle est plus aplatie que la loi normale.

Tout comme l'écart type, il quantifie la dispersion. Par contre, le facteur de forme de la distribution permet d'obtenir plus d'informations : si le kurtosis est positif, cela veut dire que le vent est canalisé, par une vallée par exemple. C'est un type d'information que l'on

cherche à obtenir quand on navigue dans une baie par exemple.

De plus, en l'associant avec la valeur du Skweness, on peut construire un coefficient de bi-modalité [Pfister *et al.*, 2013], qui va nous permettre de dire si la direction du vent oscille entre deux secteurs prédominants. Ce qui est le cas pour de nombreux plans d'eau entourés par des vallées ou des reliefs urbains.

Ces métriques peuvent ensuite être utilisées pour aider le skipper à mieux comprendre le comportement du vent. Elles peuvent aussi alimenter des outils d'assistance à la décision, pour savoir si il est statistiquement plus intéressant de virer ou non. On pense par exemple au diagramme BET.

3.2.2.5.3 Diagramme BET Introduit par [Ockam, 2013], c'est une aide à la décision pour savoir si il est intéressant de virer dans une refusante. BET pour Break Even Tacking, dont la limite de l'intérêt du virement est matérialisée par la ligne qui sépare la Figure (3.3) en deux. Si le fait de changer de bord en effectuant un virement ne ralentissait pas la vitesse du bateau, alors à chaque oscillation du vent, il faudrait virer pour placer le bateau sur le bord rapprochant par rapport à la direction moyenne du vent. En pratique, le fait de virer coûte de la distance de rapprochement au vent, du fait de la perte de vitesse engendrée par le virement. Pour que le virement soit rentable, il faut donc que l'amplitude de l'oscillation permette au moins de récupérer la distance perdue par l'exécution du virement. Ce gain est fonction de la durée de l'oscillation et de la moyenne de son amplitude. C'est ce que représente le diagramme de la Figure (3.3). Pour les performances de remontée au près et de pertes occasionnées à chaque virement spécifiées pour le diagramme de la Figure (3.3), il faut par exemple 28 secondes sur le nouveau bord pour compenser une oscillation de 8° (soit une grosse oscillation).

Ce type de diagramme et de raisonnement se base sur la valeur moyenne de la direction du vent, calculée à partir de la moyenne arithmétique (cf. section 3.2.1.2). Or, le gain apporté par une oscillation n'est pas linéaire. Il faut donc prendre en compte ce comportement dans l'élaboration de la direction représentant la moyenne des gains.

3.2.2.5.4 Direction moyenne pondérée Si l'on sélectionne une série de directions, par exemple sur une heure discrétisée à la seconde, puis, que l'on calcule sa moyenne $\langle \Theta \rangle$, alors, 50% du temps, le vent est soit à droite, soit à gauche de cette moyenne arithmétique. Par contre, si la distribution est dissymétrique, ce n'est pas parce que le vent est à droite de la moyenne arithmétique qu'il faut être en tribord (afin de minimiser la distance de louvoyage, on préfère naviguer sur l'amure qui pointe le plus vers la direction du vent moyen). Voici la méthode qui permet de définir la direction moyenne pondérée par le delta de VMG . Θ_Δ étant alors définie comme la direction scindant les gains des oscillations en deux.

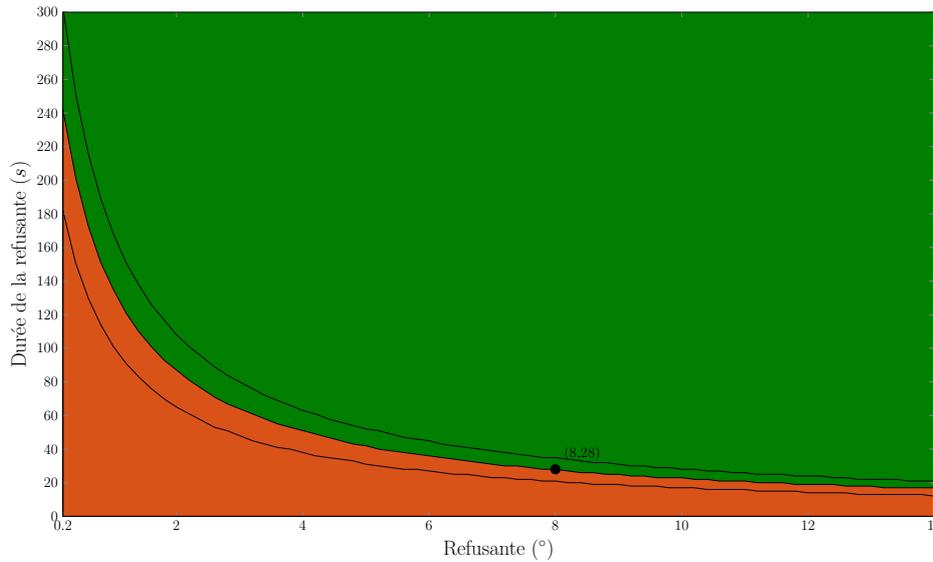


FIGURE 3.3 – Diagramme BET. La décision de virer ou non dépend du gain attendu en fonction de la distance perdue pendant le virement. Les courbes représentent le temps nécessaire sur le bord suivant pour que la perte lors du virement soit compensée par la différence de gain au vent apportée par la refusante. La limite est encadrée par une perte au virement de $\pm 25\%$.

Soit Δ_s la valeur de l'oscillation définie par :

$$\Delta_s(t) = \Theta(t) - \langle \Theta \rangle \quad (3.25)$$

Alors, la perte / le gain, du fait de naviguer sur un bord plutôt que l'autre par rapport au VMG neutre est :

$$\Delta_{VMG/s}(t) = \frac{\sin(\beta_{T_{target}} - \Delta_s(t)) - \sin(\beta_{T_{target}} + \Delta_s(t))}{\sin \beta_{T_{target}}} = \frac{-2 \cos \Delta_s(t)}{\tan \beta_{T_{target}}} \quad (3.26)$$

Comme $\Delta_{VMG/s}$ n'est pas linéaire vis-à-vis de Δ_s , cela implique qu'une adonnante de 10° n'est pas deux fois plus avantageuse qu'une de 5° mais un peu plus. On prendra alors le soin de pondérer la distribution par $1 - \Delta_{VMG/s}(t)$. Si elle est symétrique, la valeur moyenne ne changera pas. Par contre, si elle est asymétrique, la moyenne de la distribution sera décalée. C'est cette nouvelle moyenne Θ_Δ , qui définira la limite entre le bord favorable et celui qui est défavorable.

La direction moyenne pondérée Θ_Δ et le diagramme de BET doivent ensuite être associés à une analyse spectrale des oscillations pour déterminer la représentation statistique de l'oscillation moyenne, afin de savoir si il est statistiquement intéressant de virer ou non.

Maintenant que nous avons posé les définitions caractérisant le vent, étudions les

phénomènes qui lui sont propres et que l'on se doit de prendre en compte dès que l'on souhaite travailler avec des données de performance de qualité.

3.3 Phénomènes perturbateurs

Cette section est consacrée aux phénomènes liés au vent et à l'état de mer qui affectent la performance du bateau.

3.3.1 Wind Shear

3.3.1.1 Introduction

Nous avons vu en introduction avec la section 1.3.3, que le vent réel n'est pas homogène en vitesse ni en direction sur la hauteur du mât du bateau. Il faut bien faire la distinction entre les différents phénomènes qui lui sont associés lorsque l'on parle de Wind Shear, car dans le langage couramment utilisé par les marins (pour ceux qui sont au courant de ce phénomène), le Wind shear est observé par son action finale sur le bateau : le phénomène de vrillage du plan de voilure. En réalité, le vrillage du vent ressenti par les voiles est la combinaison des trois facteurs suivants : le gradient de vitesse vertical du vent réel ∇V , le vrillage du vent réel $\nabla\beta$, et le vecteur de déplacement surface qui compose le vent apparent. Cet effet a tellement d'influence sur la performance du voilier que l'université d'Auckland a construit une soufflerie dédiée, pour laquelle le gradient et le vrillage vertical peuvent être contrôlés [Flay, 1996].

3.3.1.2 Gradient de Vitesse

Le gradient de vitesse vertical peut être modélisé par une fonction puissance, ou bien par une fonction logarithmique, que l'on préférera pour les faibles hauteurs en milieu marin [Ruggles, 1970]. Alors, la vitesse du vent réel à une hauteur z peut être déterminée à l'aide de la relation suivante :

$$V(z) = \frac{V_*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (3.27)$$

Avec :

- z_0 , la longueur de rugosité, caractérisant l'effet du relief sur le gradient de vitesse de la couche limite,
- k , la constante de von Karman. Égale à 0.42,
- V_* , la vitesse de rugosité.

Alors, connaissant la longueur de rugosité et la vitesse de référence V_{ref} à la hauteur z_{ref} correspondante (soit la vitesse météo, soit la vitesse estimée à la hauteur de l'aérien), la

vitesse de rugosité peut être obtenue en remaniant (3.27) :

$$V_* = \frac{k V_{ref}}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} \quad (3.28)$$

Ainsi, à partir des équations (3.27) & (3.28), la vitesse du vent réel peut être transposée à l'altitude souhaitée à partir de la vitesse de référence :

$$V(z) = V_{ref} \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} \quad (3.29)$$

Ce qui permet par exemple d'estimer la vitesse du vent réel à la hauteur du centre de poussée vélique ou à 10m, en fonction de celle mesurée par l'aérien à la hauteur z_{ref} .

La problématique est maintenant de connaître z_0 , la longueur de rugosité.

3.3.1.2.1 Longueur de rugosité Elle est fonction de la composition de la surface du sol : plus il sera lisse, plus la longueur de rugosité sera faible et inversement. Il existe des tables pour l'approximer en fonction du terrain, que ce soit de l'herbe, une forêt, ou encore une ville : cf. Table (3.1). Par contre, en mer, la rugosité sera fonction de la hauteur des vagues, elles-mêmes fonctions de la vitesse et du fetch du vent. En mer, cette longueur est très faible, de l'ordre de quelques millimètres. Elle peut être déterminée si l'on possède une mesure du profil vertical, par exemple à l'aide d'un Lidar ou de 2 points de mesure à des hauteurs différentes. Mais ces techniques ne sont pas applicables pour des voiliers de course au large en navigation.

Concernant l'océan, cette longueur de rugosité peut être estimée d'après la formule de Charnock [Charnock, 1958] :

$$z_0 = \frac{\beta V_*^2}{g} \quad (3.30)$$

Mais l'équation (3.30) n'est pas d'une grande utilité car β dépend de la période des vagues, et V_* , la vitesse de rugosité doit également être connue. On préférera alors la version simplifiée proposée par Cook [Cook, 1985], qui n'est fonction que de la vitesse du vent réel à 10 mètres :

$$z_0 = \frac{\alpha_c \hat{V}^2(10)}{g} \quad (3.31)$$

Avec $\alpha_c = 0,00005$, variant de $\pm 20\%$ en fonction du fetch [Layer et Bretherton, 1954].

Voyons maintenant les profils que l'on peut obtenir avec cette formule.

3.3.1.2.2 Exemples de gradients de vitesse en fonction de V_{ref} La Figure (3.4) expose différents gradients de vitesse en fonction de la force du vent réel à 10 mètres d'altitude. On remarque que le coude est prononcé sur les premiers mètres de hauteur. Ainsi, contrairement à ce que l'on pourrait penser, l'effet du gradient a tout autant d'importance sur les bateaux ayant un "petit" mât, car il est situé dans cette zone de forte variation. La différence de vitesse relative entre la base et la tête de mât sera d'autant plus prononcée qu'avec un espar de grande taille.

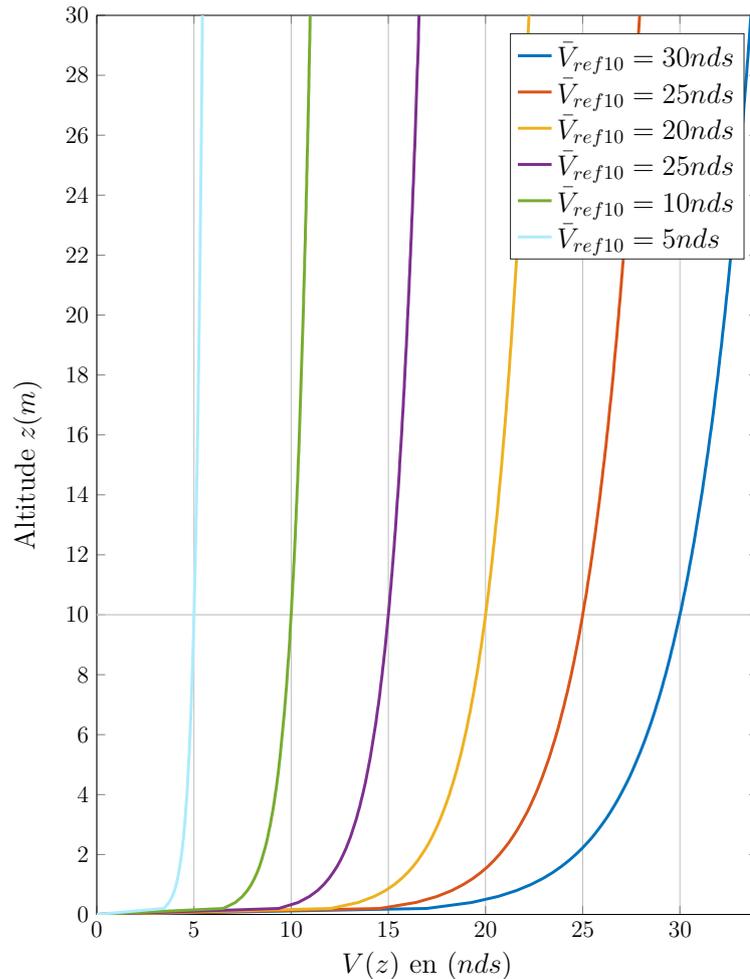


FIGURE 3.4 – Gradients de vitesse en fonction de l'altitude, pour un vent réel à la référence 10m établi au large.

Toutefois, cette estimation de la longueur de la rugosité doit être pondérée par plusieurs paramètres, notamment l'âge des vagues, caractérisé par le fetch.

3.3.1.2.3 Correction du fetch L'équation (3.31) n'est valable que pour un vent établi, donc au large. On fera alors attention de corriger la longueur de rugosité lorsque que l'on

navigue près des côtes. Si le vent vient de terre, le gradient vertical sera plus marqué car le flux aura au préalable été modelé par le type de terrain qu'il aura rencontré. La Table (3.1) donne un exemple des longueurs de rugosité pour différents types de surfaces. On remarque que l'ordre de grandeur entre la terre et l'océan est très important.

$z_0(m)$	Type de Terrain	Classe
5.10^{-5} - 0,002	Océan	0
0,0003	Sable	
0,01	Herbe	
0,02-0,05	Champs	1
0,2	Végétations	2
0,4 - 1	Foret	3
1-2	Ville	4

TABLE 3.1 – Exemples de longueurs de rugosité en fonction du type de terrain. Informations issues de [Troen et Lundtang Petersen, 1989].

Si le bateau a pour programme de naviguer dans une baie, il est possible de travailler avec ce que l'on appelle une rose de rugosité. Elle permet de spécifier la rugosité du terrain en fonction de l'orientation du vent réel. Elle n'est par contre valable que pour une zone de navigation limitée.

Un autre paramètre affectant le gradient de vitesse doit être pris en compte. Il s'agit de la différence de température entre l'air et l'eau.

3.3.1.2.4 Stabilité en température Pour une même rugosité de surface, le gradient va plus ou moins être prononcé en fonction des échanges de températures verticaux par convection. Plus le gradient est marqué (plus la température diminue rapidement avec l'altitude), moins il y aura d'échanges convectifs et donc moins de turbulences. Au contraire, si la température de l'eau est plus chaude que l'air, alors il y aura beaucoup d'échanges de température par des flux verticaux, ce qui tend à minimiser le gradient de vitesse vertical. Il est possible de prendre en compte ce phénomène en pondérant la longueur de rugosité estimée par la différence de température entre l'air et l'eau :

$$\Delta T = T_{air} - T_{eau} \quad (3.32)$$

Alors, la rugosité devient :

$$z_0(\Delta T) = \begin{cases} z_0 C_{\Delta T p} \Delta T^2, & \text{si } \Delta T > 0 \\ \frac{z_0}{C_{\Delta T n} \Delta T^2}, & \text{si } \Delta T < 0 \end{cases} \quad (3.33)$$

Avec, d'après des tables évaluées par J.-Y. Bernot (communication personnelle, 2015) réadaptées par mes soins pour cette formule :

- $C_{\Delta T_p} = 0,5$,
- $C_{\Delta T_n} = 0,9$.

Nous venons de voir le changement de vitesse du vent réel suivant l'altitude. Cependant, il faut aussi savoir que sa direction subit également une variation suivant l'altitude.

3.3.1.3 Gradient de direction

Contrairement au gradient de vitesse que l'on peut estimer avec les méthodes précédemment exposées, le gradient de direction, représentant le cisaillement vertical du vent réel, est lui beaucoup plus compliqué à estimer. En pratique, si l'on ne dispose pas d'un mât de mesure, ou bien d'un profil vertical obtenu à l'aide d'un appareil de type Lidar, cette mesure du cisaillement n'est aujourd'hui pas réalisable en navigation. Ce cisaillement vertical est principalement dû à l'effet de la force de Coriolis, qui induit un changement de direction quand la vitesse varie (en l'occurrence, lorsque le vent est ralenti par la surface). Ce phénomène dans sa globalité est bien modélisé par la spirale d'Ekman, mais n'est pas applicable pour des altitudes si proches de la surface.

Nous verrons dans la section suivante que le gradient de vitesse induit un cisaillement dans le vent apparent. Le cisaillement du vent réel n'apportera pas d'erreur sur l'estimation de la direction du vent réel (à l'altitude du point de mesure), mais s'ajoutera au cisaillement de vent apparent, le rendant non symétrique d'un bord sur l'autre.

3.3.1.4 Cisaillement du vent apparent

Nous avons vu en introduction à l'aide de la Figure (1.16), que la projection du vecteur de déplacement du bateau \vec{V}_{Surf} sur le vent réel $\vec{V}_{T_{Surf}}(z)$, induit une variation du vent apparent $\vec{V}_{app}(z)$ à la fois en intensité et en direction. Afin de visualiser cette variation, dans l'objectif de la prendre en compte pour les réglages du bateau et les calculs de performance, il est possible d'établir des polaires de vitesses et d'angles de vent apparent, et ce pour les différentes altitudes considérées. La Table (3.2) en est l'exemple pour la polaire d'angle de vent apparent d'un 60" Imoca à 2 mètres d'altitude. En effectuant ce calcul sur l'ensemble de la hauteur du mât, il est possible de reconstituer le vrillage du vent apparent.

La Table (3.3) représente la différence d'angle de vent apparent entre l'altitude 2 et 30 mètres. On remarque que le vrillage devient rapidement très important aux allures *VMG* portant (cf. Figure (1.4)), d'où l'importance de prendre en compte ce phénomène.

$\beta_T \setminus V_T(2)$	4,36	8,56	12,68	16,72	20,71	24,64
30	18,6	19,0	20,4	22,1	23,3	24,2
40	19,9	21,1	23,5	26,1	28,5	30,0
50	21,6	23,9	27,8	30,9	33,5	35,5
60	23,4	27,1	32,1	35,9	38,9	41,2
70	25,4	30,4	36,1	40,4	43,6	46,1
80	27,5	33,4	39,7	44,1	47,5	49,8
90	29,9	36,2	42,7	46,6	50,5	52,8
100	31,7	38,6	45,0	48,8	52,6	56,5
110	34,1	41,0	47,1	50,8	54,5	59,0
120	37,6	43,6	49,4	53,1	57,0	61,3
130	43,4	47,6	53,0	55,6	60,6	65,3
140	55,3	55,1	58,9	59,9	64,0	67,9
150	88,6	72,3	75,3	70,5	76,4	74,4
160	121,6	110,4	107,2	116,9	122,7	122,0
170	151,3	151,4	149,2	151,1	151,2	154,8
180	180,0	180,0	180,0	180,0	180,0	180,0

TABLE 3.2 – Polaire d’angle de vent apparent d’un 60” Imoca, calculée à partir de sa polaire de vitesse (cf. Figure (1.20)) et du vent réel surface à 2m de hauteur. Il est intéressant de noter que jusqu’à une allure égale à $\beta_T = 150^\circ$, l’angle de vent apparent reste inférieur à 90° : bien que le vent réel soit orienté plus que le 3/4 arrière, le vent apparent vient lui tout de même de l’avant.

$\beta_T \setminus V_T(10)$	5	10	15	20	25	30
30	1,5	1,7	1,7	1,6	1,4	1,3
40	2,3	2,5	2,6	2,5	2,4	2,2
50	2,9	3,3	3,5	3,4	3,3	3,1
60	3,5	4,1	4,3	4,3	4,2	4,1
70	4,2	5,0	5,3	5,4	5,3	5,2
80	4,9	5,9	6,4	6,6	6,6	6,5
90	5,7	7,0	7,7	8,0	8,1	8,1
100	6,6	8,2	9,1	9,6	9,9	9,9
110	7,8	9,7	10,9	11,6	12,0	12,1
120	9,5	11,7	13,2	14,0	14,6	14,9
130	12,3	14,6	16,3	17,3	18,0	18,3
140	17,0	19,1	20,9	22,1	22,9	23,3
150	19,3	25,2	26,4	28,7	28,6	30,1
160	14,4	21,4	24,2	19,9	17,2	18,0
170	7,5	8,1	9,9	9,0	9,2	7,2
180	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

TABLE 3.3 – Différence d’angle de vent apparent entre l’altitude 2 mètres et 30 mètres, valable pour la polaire de performance d’un 60” Imoca.

Cette amplitude du vrillage n'altère pas le calcul de la direction du vent réel, mais il est intéressant de pouvoir la quantifier pour d'une part, régler le plan de voilure et d'autre part, transmettre cette information au pilote automatique. En effet, si ce vrillage n'est pas pris en compte, le pilote va se baser sur l'angle de vent apparent de la hauteur de l'aérien, alors que le centre vélique (la résultante des efforts aérodynamiques), est en général situé à environ 1/3 de la hauteur du plan de voilure. Soit pour un Imoca, 20 mètres sous l'aérien. Alors, si l'un des objectifs du pilote est de maintenir une consigne d'angle de vent apparent (cf. section 4.3), il est plus intéressant qu'il le fasse pour la section de la voile ayant le meilleur rendement.

Une autre particularité du vent réel qui influe significativement sur la performance du bateau, et qu'il faut également prendre en considération, est ce que l'on nomme couramment le "poids de l'air".

3.3.2 "Poids de l'air"

3.3.2.1 Introduction

Si vous parlez avec un régatier qui vous raconte sa traversée de l'Atlantique, il y a de fortes chances qu'il vous dise que sous les alizés, il a réussi à tenir son grand spi et sa GV haute à des forces de vent plus élevées que d'habitude. Ce phénomène n'est pas dû au fait que le bateau tienne mieux la toile sous les tropiques, mais parce que la force transmise par le vent sur les voiles y est plus faible. Ceci est dû au fait que pendant la période d'entraînement, en Bretagne et en hiver, le navigateur a construit ses repères et polaires de performances pour des conditions atmosphériques spécifiques (froid). Puis, une fois sous les tropiques, les conditions atmosphériques rencontrées ne sont plus les mêmes, la densité de l'air y étant généralement plus faible. Aujourd'hui, beaucoup de monde parle de ce phénomène sous le terme de "poids de l'air", mais il n'est pris en compte dans aucune centrale du commerce. Alors, afin de rendre cet effet transparent pour le navigateur et les calculs de performance, il faut prendre en compte l'effet des variations de la densité de l'air. Cette densité peut être déterminée à partir de la mesure de la pression atmosphérique, de la température et de l'humidité relative de l'air.

3.3.2.2 Masse volumique de l'air humide

La masse volumique de l'air humide est obtenue d'après :

$$\rho = \frac{P_s}{R_h T} \quad (3.34)$$

en kg m^3 , avec P_s la pression de l'air en Pa, T la température de l'air en $^\circ\text{K}$ et R_h la constante spécifique de l'air humide définie d'après l'équation suivante :

$$R_h = \frac{R_s}{1 - \left(\varphi \frac{P_{sat}}{P_s} \left(1 - \frac{R_s}{R_v}\right)\right)} \quad (3.35)$$

Avec :

- $R_s = 287.06 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, la constante spécifique de l'air sec,
- $R_v = 461 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, la constante spécifique de la vapeur d'eau,
- φ , l'humidité relative (mesurée par l'hygromètre),
- P_s , la pression de l'air, en Pa (mesurée par le baromètre),
- P_{sat} la pression de vapeur saturante de l'eau dans l'air, en Pa d'après la formule de Tetens [Junzeng *et al.*, 2012] :

$$P_{sat} = C_{P_{sat}0} 10^{\frac{C_{P_{sat}1}T}{C_{P_{sat}2} + T}} \quad (3.36)$$

Avec :

- $C_{P_{sat}0} = 610,78$
- $C_{P_{sat}1} = 7,5$
- $C_{P_{sat}2} = 237,3$

Alors, la densité devient d'après (3.35) et (3.36) :

$$\rho(P_s, T, \varphi) = \frac{P_s - \left(\varphi C_{P_{sat}0} 10^{\frac{C_{P_{sat}1}T}{C_{P_{sat}2} + T}} \left(1 - \frac{R_s}{R_v}\right)\right)}{R_s (T + 273,15)} \quad (3.37)$$

On peut alors obtenir les Tables (3.4) qui représentent la variation de la densité en fonction des paramètres atmosphériques. On remarque que le bateau est rapidement susceptible de rencontrer des valeurs de ρ allant de -10% à $+10\%$ de la valeur moyenne. Par exemple, sur les tables de la Figure (3.4), la table (a) donne pour des valeurs de pression et de température de 1023 hPa et -5° , une densité de 1.327, soit 8% de plus que la référence. Un autre exemple, avec toujours des valeurs raisonnables, tiré de la table (e) à 1003 hPa et 30° , donne une densité de 1.334, soit 9% de moins que la référence.

3.3.2.3 Répercussions sur la force transmise aux voiles

Nous venons de voir que la densité de l'air varie en fonction des conditions atmosphériques. Or, d'après l'équation (1.2), la force de portance générée par les voiles est fonction de cette

$T(^{\circ}C)$	$\varphi = 30\%$			$\rho(Kg/m^3)$		$P(hPa)$	
	983,25	993	1003	1013,25	1023	1033	1043
-10	1,300	1,313	1,326	1,340	1,353	1,366	1,379
-5	1,275	1,288	1,301	1,314	1,327	1,340	1,353
0	1,251	1,263	1,276	1,289	1,302	1,314	1,327
5	1,227	1,240	1,252	1,265	1,277	1,290	1,302
10	1,204	1,216	1,228	1,241	1,253	1,265	1,277
15	1,181	1,193	1,205	1,217	1,229	1,241	1,253
20	1,158	1,170	1,181	1,194	1,205	1,217	1,229
25	1,135	1,146	1,158	1,170	1,181	1,193	1,205
30	1,111	1,123	1,134	1,146	1,157	1,169	1,180
35	1,088	1,099	1,110	1,121	1,132	1,144	1,155
40	1,063	1,074	1,085	1,096	1,107	1,118	1,129

(a) Évolution de la densité de l'air pour $\varphi = 30\%$.

$T(^{\circ}C)$	$\varphi = 30\%$				$P(hPa)$		
	983,25	993	1003	1013,25	1023	1033	1043
-10	2,8	3,3	3,8	4,3	4,8	5,3	5,8
-5	1,8	2,3	2,8	3,3	3,8	4,3	4,8
0	0,9	1,4	1,9	2,4	2,9	3,4	3,9
5	-0,1	0,4	0,9	1,4	1,9	2,4	2,9
10	-1,0	-0,5	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0
15	-1,9	-1,4	-0,9	-0,4	0,1	0,6	1,1
20	-2,7	-2,3	-1,8	-1,3	-0,8	-0,3	0,2
25	-3,6	-3,1	-2,6	-2,1	-1,7	-1,2	-0,7
30	-4,5	-4,0	-3,5	-3,0	-2,5	-2,1	-1,6
35	-5,3	-4,9	-4,4	-3,9	-3,4	-2,9	-2,5
40	-6,2	-5,7	-5,2	-4,7	-4,3	-3,8	-3,3

(b) Variation en % de la vitesse de vent équivalente.

$T(^{\circ}C)$	$\varphi = 75\%$			$\rho(Kg/m^3)$		$P(hPa)$	
	983,25	993	1003	1013,25	1023	1033	1043
-10	1,301	1,313	1,327	1,340	1,353	1,366	1,380
-5	1,276	1,288	1,301	1,315	1,327	1,340	1,353
0	1,252	1,264	1,277	1,290	1,302	1,315	1,328
5	1,228	1,241	1,253	1,266	1,278	1,291	1,303
10	1,205	1,217	1,230	1,242	1,254	1,267	1,279
15	1,183	1,195	1,207	1,219	1,231	1,243	1,255
20	1,161	1,172	1,184	1,196	1,208	1,220	1,232
25	1,138	1,150	1,161	1,173	1,185	1,196	1,208
30	1,116	1,127	1,139	1,151	1,162	1,173	1,185
35	1,094	1,105	1,116	1,127	1,138	1,150	1,161
40	1,071	1,081	1,093	1,104	1,115	1,126	1,137

(c) Évolution de la densité de l'air pour $\varphi = 75\%$.

$T(^{\circ}C)$	$\varphi = 75\%$				$P(hPa)$		
	983,25	993	1003	1013,25	1023	1033	1043
-10	2,7	3,3	3,8	4,3	4,8	5,3	5,8
-5	1,8	2,3	2,8	3,3	3,8	4,3	4,8
0	0,8	1,3	1,8	2,3	2,8	3,3	3,8
5	-0,1	0,3	0,9	1,4	1,9	2,4	2,8
10	-1,1	-0,6	-0,1	0,4	0,9	1,4	1,9
15	-2,0	-1,5	-1,0	-0,5	0,0	0,4	0,9
20	-2,9	-2,5	-2,0	-1,5	-1,0	-0,5	0,0
25	-3,9	-3,4	-2,9	-2,4	-1,9	-1,5	-1,0
30	-4,8	-4,3	-3,9	-3,4	-2,9	-2,4	-1,9
35	-5,8	-5,3	-4,8	-4,3	-3,9	-3,4	-2,9
40	-6,8	-6,3	-5,8	-5,3	-4,9	-4,4	-3,9

(d) Variation en % de la vitesse de vent équivalente.

$T(^{\circ}C)$	$\varphi = 100\%$			$\rho(Kg/m^3)$		$P(hPa)$	
	983,25	993	1003	1013,25	1023	1033	1043
-10	1,300	1,313	1,326	1,340	1,353	1,366	1,379
-5	1,275	1,288	1,301	1,314	1,327	1,340	1,353
0	1,251	1,263	1,276	1,289	1,302	1,314	1,327
5	1,227	1,240	1,252	1,265	1,277	1,290	1,302
10	1,204	1,216	1,228	1,241	1,253	1,265	1,277
15	1,181	1,193	1,205	1,217	1,229	1,241	1,253
20	1,158	1,170	1,181	1,194	1,205	1,217	1,229
25	1,135	1,146	1,158	1,170	1,181	1,193	1,205
30	1,111	1,123	1,134	1,146	1,157	1,169	1,180
35	1,088	1,099	1,110	1,121	1,132	1,144	1,155
40	1,063	1,074	1,085	1,096	1,107	1,118	1,129

(e) Évolution de la densité de l'air pour $\varphi = 100\%$.

$T(^{\circ}C)$	$\varphi = 100\%$				$P(hPa)$		
	983,25	993	1003	1013,25	1023	1033	1043
-10	2,7	3,2	3,8	4,3	4,8	5,3	5,8
-5	1,7	2,2	2,8	3,3	3,8	4,3	4,8
0	0,8	1,3	1,8	2,3	2,8	3,3	3,8
5	-0,2	0,3	0,8	1,3	1,8	2,3	2,8
10	-1,1	-0,7	-0,2	0,4	0,8	1,3	1,8
15	-2,1	-1,6	-1,1	-0,6	-0,1	0,4	0,9
20	-3,1	-2,6	-2,1	-1,6	-1,1	-0,6	-0,1
25	-4,0	-3,5	-3,1	-2,6	-2,1	-1,6	-1,1
30	-5,0	-4,5	-4,1	-3,6	-3,1	-2,6	-2,1
35	-6,0	-5,6	-5,1	-4,6	-4,1	-3,6	-3,2
40	-7,1	-6,6	-6,2	-5,7	-5,2	-4,7	-4,3

(f) Variation en % de la vitesse de vent équivalente.

TABLE 3.4 – Variations de la densité de l'air en fonction des paramètres atmosphériques. La densité de référence est $1,232Kg/m^3$, ce qui correspond aux paramètres suivants : $16^{\circ}/1013,2hPa/80\%$, soit les valeurs moyennes annuelles à Lorient. Sur la colonne de droite sont représentées les variations équivalentes de vitesse de vent (racine carrée de la densité de l'air relative).

densité :

$$F = \frac{1}{2}\rho V^2 S C_p$$

Cela veut dire que pour une même vitesse de vent, la force de portance ne sera pas identique pour des valeurs de ρ différentes. Alors, pour une même vitesse de vent, la performance du bateau sera dépendante de la densité de l'air. Ce qui est problématique, car la performance du bateau (définie par ses polaires, cf. Figure (1.20)), est fonction de la vitesse du vent. Afin

de masquer au skipper et aux algorithmes de calcul de performance l'effet de la densité de l'air, il est envisageable de leur fournir comme donnée de vent, non pas la vitesse mesurée, mais la vitesse de vent qui produirait la même force de portance et donc des performances équivalentes. Soit ρ_0 , la densité de référence, la vitesse de vent V_c produisant la même force de portance qu'à la densité de référence, peut être introduite d'après la relation suivante :

$$\rho_0 V^2 = \rho V_c^2 \quad (3.38)$$

Alors V_c , la vitesse de vent "constant", produisant la même force de portance est déterminée d'après :

$$V_c = \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}} V \quad (3.39)$$

Enfin, la vitesse de vent V_e équivalente affichée et envoyée aux algorithmes de calcul de la performance peut être obtenue d'après :

$$V_e = \frac{1}{\sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}}} V \quad (3.40)$$

Les variations en pourcentage de $\sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}}$ sont affichées sur les tables de la Figure (3.4) pour les densités correspondantes.

3.3.2.4 Énergie transportée par le vent réel

Le raisonnement du paragraphe précédent repose sur la force de portance générée sur les voiles. Or, cette force est produite par le vent apparent, pas par le vent réel. Pourtant, c'est la vitesse du vent réel que l'on cherche à normaliser. Il est alors préférable de raisonner à partir de l'énergie transportée par le vent réel. Cette énergie est définie en joules d'après la formule de l'énergie cinétique :

$$E_c = \frac{1}{2} m V^2 \quad (3.41)$$

Elle est donc fonction de m , la masse du volume d'air dont on souhaite quantifier l'énergie disponible. Soit S la section verticale pour laquelle on veut quantifier la quantité d'énergie cinétique la traversant pendant un temps t . Alors, la masse d'air qui traverse cette section pendant ce temps t est :

$$m = \rho S V t \quad (3.42)$$

La quantité d'énergie cinétique traversant cette section durant le temps t est alors :

$$E = \frac{1}{2}\rho SVtV^2 \quad (3.43)$$

Si l'on raisonne en terme de puissance, et si l'on choisit $t = 1s$, alors la puissance en watts traversant cette section est :

$$P_{\text{arret}} = \frac{1}{2}\rho SV^3 \quad (3.44)$$

Avec V la vitesse du vent traversant la section. Lorsque cette section est immobile, V est bien équivalent à la vitesse du vent réel. Lorsque la section est en mouvement, c'est la vitesse relative de la section par rapport au vent réel qu'il faut prendre en compte (si la section avance dans le sens du vent à la même vitesse que lui, alors aucune masse d'air ne traverse cette section). Pour un voilier, cette vitesse relative est définie d'après $V + VMG$ (Le VMG est positif au près et négatif au portant). Alors, la puissance perçue par le bateau en mouvement est :

$$P_{\text{mouvement}} = \frac{1}{2}\rho S(V + VMG)^3 \quad (3.45)$$

Ainsi, l'égalité visant à équilibrer la puissance perçue par la section S , lorsque le vent souffle à une vitesse V , pour la densité de référence ρ_0 et lorsque la densité ρ est quelconque, est définie par la relation suivante, qui est équilibrée par la vitesse de vent constant V_c :

$$\frac{1}{2}\rho_0 S(V + VMG)^3 = \frac{1}{2}\rho S(V_c + VMG)^3 \quad (3.46)$$

Ce qui donne la relation suivante :

$$V_c = \sqrt[3]{\frac{\rho_0}{\rho}} (V + VMG) - VMG \quad (3.47)$$

On retrouve alors la vitesse du vent normalisé V_c en fonction de la densité de référence ρ_0 , de la densité mesurée ρ pour laquelle on souhaite corriger le vent réel V , et enfin le VMG qui influe sur la vitesse relative à V .

Les Tableaux (3.5), montrent l'évolution de la correction en fonction de la densité, du vent réel et du VMG . On remarque que lorsque la densité actuelle est plus faible que la densité de référence, à l'arrêt, le vent constant est bien estimé à la hausse (pour avoir la même quantité d'énergie, il faudrait que le vent souffle plus fort). Puis, cette correction est revue à la hausse lorsque le bateau se rapproche du vent (VMG positif) car la "quantité" de vent vue par le bateau augmente. C'est comme si le vent de référence sur lequel on applique le même coefficient de correction avait augmenté. Ainsi, le vent constant est plus élevé et inversement quand le

VMG est négatif, lorsque le bateau est au portant. Le raisonnement inverse s'applique quand la densité est plus élevée que la référence (alors la puissance équivalente est atteinte plus tôt).

$\sqrt[3]{\frac{\rho_0}{\rho}} = 0,9655$ Ete : $\rho = 1,1088$							
VMG \ V	5	10	15	20	25	30	35
-30	5,86	10,69	15,52	20,35	25,17	30,00	34,83
-25	5,69	10,52	15,35	20,17	25,00	29,83	34,65
-20	5,52	10,35	15,17	20,00	24,83	29,65	34,48
-15	5,35	10,17	15,00	19,83	24,65	29,48	34,31
-10	5,17	10,00	14,83	19,65	24,48	29,31	34,14
-5	5,00	9,83	14,65	19,48	24,31	29,14	33,96
0	4,83	9,65	14,48	19,31	24,14	28,96	33,79
5	4,65	9,48	14,31	19,14	23,96	28,79	33,62
10	4,48	9,31	14,14	18,96	23,79	28,62	33,45
15	4,31	9,14	13,96	18,79	23,62	28,45	33,27
20	4,14	8,96	13,79	18,62	23,45	28,27	33,10
25	3,96	8,79	13,62	18,45	23,27	28,10	32,93

(a) Vent équivalent V_e pour une densité faible.

Ete : $\rho = 1,1088$							
VMG \ V	5	10	15	20	25	30	35
-30	17,3	6,9	3,5	1,7	0,7	0,0	-0,5
-25	13,8	5,2	2,3	0,9	0,0	-0,6	-1,0
-20	10,4	3,5	1,2	0,0	-0,7	-1,2	-1,5
-15	6,9	1,7	0,0	-0,9	-1,4	-1,7	-2,0
-10	3,5	0,0	-1,2	-1,7	-2,1	-2,3	-2,5
-5	0,0	-1,7	-2,3	-2,6	-2,8	-2,9	-3,0
0	-3,5	-3,5	-3,5	-3,5	-3,5	-3,5	-3,5
5	-6,9	-5,2	-4,6	-4,3	-4,1	-4,0	-3,9
10	-10,4	-6,9	-5,8	-5,2	-4,8	-4,6	-4,4
15	-13,8	-8,6	-6,9	-6,0	-5,5	-5,2	-4,9
20	-17,3	-10,4	-8,1	-6,9	-6,2	-5,8	-5,4
25	-20,7	-12,1	-9,2	-7,8	-6,9	-6,3	-5,9

(b) Variations en % de V_e par rapport à V_T .

$\sqrt[3]{\frac{\rho_0}{\rho}} = 1,0322$ Hiver : $\rho = 1,355$							
VMG \ V	5	10	15	20	25	30	35
-30	4,19	9,36	14,52	19,68	24,84	30,00	35,16
-25	4,36	9,52	14,68	19,84	25,00	30,16	35,32
-20	4,52	9,68	14,84	20,00	25,16	30,32	35,48
-15	4,68	9,84	15,00	20,16	25,32	30,48	35,64
-10	4,84	10,00	15,16	20,32	25,48	30,64	35,81
-5	5,00	10,16	15,32	20,48	25,64	30,81	35,97
0	5,16	10,32	15,48	20,64	25,81	30,97	36,13
5	5,32	10,48	15,64	20,81	25,97	31,13	36,29
10	5,48	10,64	15,81	20,97	26,13	31,29	36,45
15	5,64	10,81	15,97	21,13	26,29	31,45	36,61
20	5,81	10,97	16,13	21,29	26,45	31,61	36,77
25	5,97	11,13	16,29	21,45	26,61	31,77	36,93

(c) Vent équivalent V_e pour une densité élevée.

Hiver : $\rho = 1,355$							
VMG \ V	5	10	15	20	25	30	35
-30	-16,1	-6,4	-3,2	-1,6	-0,6	0,0	0,5
-25	-12,9	-4,8	-2,1	-0,8	0,0	0,5	0,9
-20	-9,7	-3,2	-1,1	0,0	0,6	1,1	1,4
-15	-6,4	-1,6	0,0	0,8	1,3	1,6	1,8
-10	-3,2	0,0	1,1	1,6	1,9	2,1	2,3
-5	0,0	1,6	2,1	2,4	2,6	2,7	2,8
0	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
5	6,4	4,8	4,3	4,0	3,9	3,8	3,7
10	9,7	6,4	5,4	4,8	4,5	4,3	4,1
15	12,9	8,1	6,4	5,6	5,2	4,8	4,6
20	16,1	9,7	7,5	6,4	5,8	5,4	5,1
25	19,3	11,3	8,6	7,3	6,4	5,9	5,5

(d) Variations en % de V_e par rapport à V_T .

TABLE 3.5 – Exemples des vents équivalents obtenus en fonction du VMG, pour une densité d'air faible, que l'on peut rencontrer en été, et une densité élevée, que l'on peut rencontrer en hiver.

On remarque que lorsque le VMG est négatif et d'amplitude égale à la vitesse du vent (le bateau se déplaçant à la même vitesse que le vent), alors le vent constant est identique (correction égale à 1). Ce qui paraît logique car la "quantité" de vent traversant le bateau est nulle. De même, lorsque le bateau remonte à la même vitesse que le vent, alors cette "quantité" de vent est doublée. La correction en pourcentage est donc identique entre les différentes vitesses de vent (pour un même ρ).

Ainsi, le vent équivalent V_e que l'on va utiliser pour l'affichage et fournir aux algorithmes de performance est :

$$V_e = \sqrt[3]{\frac{\rho}{\rho_0}} (V_T + VMG) - VMG \tag{3.48}$$

3.3.2.5 Conclusion

Pour pondérer la variation de la densité de l'air, lorsque l'on fait des tests en soufflerie quand on travaille directement avec le vent apparent, alors on utilisera la relation (3.40). Lorsque l'on souhaite pondérer les variations de la densité de l'air en navigation, on partira sur le raisonnement basé sur l'énergie cinétique transportée par le vent réel. Cependant, nous avons poussé le raisonnement pour tenir compte du *VMG*. Bien que ce raisonnement soit valable, il implique, pour une même condition atmosphérique, une correction différente en fonction du *VMG*. Donc une vitesse équivalente différente entre le près et le portant par exemple. Or, on souhaite normaliser l'énergie disponible sur le plan d'eau, pas la façon dont le voilier la transforme. On se limitera donc à la relation suivante :

$$V_e = \sqrt[3]{\frac{\rho}{\rho_0}} V_T \quad (3.49)$$

Cette équation n'est pas dépendante de l'allure du bateau, uniquement des conditions atmosphériques. De plus, comme elle normalise la puissance, elle est élevée à la racine cubique, ses corrections seront d'amplitudes moins élevées que la proposition à la racine carrée obtenue d'après l'équation de la portance.

3.3.3 Estimation de l'upwash

Nous avons vu dans la section 1.3.2 que l'aérien est positionné dans une zone où le champ de vent subit une forte déformation à cause de son interaction avec les profils aérodynamiques. Aujourd'hui, la principale erreur faite par les algorithmes de reconstruction du vent réel, lorsqu'il prennent en compte le phénomène d'upwash, est due au fait que cette correction n'est pas effectuée au bon moment. Que ce soit chez les principaux concurrents, chez nke, ou pour des installations dédiées ([Morgere *et al.*, 2013]), la correction est d'une part stockée sous forme de tables que l'utilisateur doit remplir manuellement, ce qui est rarement le cas, ou quand ça l'est, elles sont le plus souvent mal renseignées. D'autre part, la correction est appliquée sur le vent réel, alors que le phénomène est rattaché au vent effectif [Fetet et Tomao, 2014].

Arvel Gentry a expliqué le principe en 1971 [Gentry, 1971] et proposé 10 ans plus tard [Gentry, 1981], la formule suivante pour estimer l'amplitude de cette perturbation lorsque l'angle de vent apparent est fermé :

$$\gamma = C_{\gamma 1} \cos(C_{\gamma 0} \gamma V_{eff}) \cos(\gamma \beta_{eff}) \quad (3.50)$$

Un exemple des valeurs obtenues par l'application de cette équation est présenté sur la Figure (3.5). En pratique, les valeurs de $C_{\gamma 0}$ & $C_{\gamma 1}$ vont dépendre de la hauteur de l'aérien par

rapport à la tête et du type de gréement. C_{γ_1} caractérise l'amplitude de l'effet de l'upwash et varie entre 6 et 15 en fonction des installations. C_{γ_0} caractérise la vitesse de décroissance de γ en fonction de la vitesse du vent effectif.

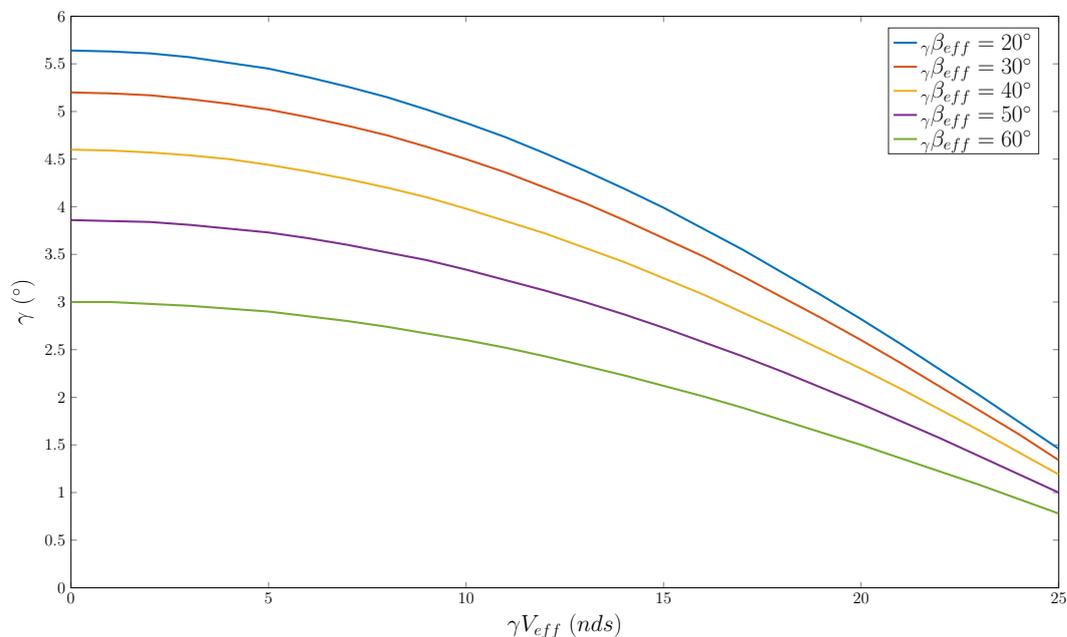


FIGURE 3.5 – Graphique de l'évolution de l'angle d'upwash estimé par la formule (3.50) pour $C_{\gamma_0} = 3$ & $C_{\gamma_1} = 6$. L'amplitude de γ est fonction de l'angle d'incidence du vent sur le profil et devient nulle pour $\gamma\beta_{eff} = 90^\circ$.

Une fois C_{γ_0} & C_{γ_1} bien calibrés expérimentalement, cette technique permet une bonne correction de l'angle d'upwash pour les angles de vent apparent fermés. Heureusement, de nos jours, les bateaux qui sont susceptibles de s'intéresser à la compensation de ce phénomène, sont suffisamment performants pour naviguer avec un angle de vent apparent toujours fermé dès que le vent se met à souffler. La même méthode peut être également appliquée pour corriger l'effet de l'upwash sur la vitesse du vent effectif. Cependant, cet algorithme n'est pratiquement pas déployé. Il n'a été porté dans un calculateur commercial que par [McCurdy et Pedrick, 1981] pour sa marque *Ockam*^{MD} [Ockam, 2009] ainsi que par Bravo.

3.3.4 État de la mer

L'état de la mer est un paramètre qui a une forte influence sur la performance du bateau. D'une part, il influe directement sur la dynamique du bateau en opposant une résistance à l'avancement, mais également en abaissant le rendement aérodynamique des voiles à cause du tangage (cf. annexe C). D'autre part, il modifie le gradient vertical en changeant la longueur de rugosité z_0 . C'est donc un paramètre important à prendre en compte. Cet état de mer est

normalisé par la hauteur significative des vagues $H_{1/3}$. Cette mesure correspond à la hauteur moyenne du tiers des vagues les plus importantes (cette référence a été choisie car c'est cette hauteur que l'humain retranscrit quand il observe la mer). On peut alors la retrouver par analyse spectrale ou bien plus simplement d'après [Holthuijsen, 2010] via la relation suivante :

$$H_{1/3} = 4 \sigma_{H(t)} \quad (3.51)$$

Ou, à partir de la valeur efficace [Dean et Dalrymple, 1991] :

$$H_{1/3} = 1,4 \bar{H}_q(t) \quad (3.52)$$

Ou encore, à partir de la valeur moyenne [Ainsworth, 2000] :

$$H_{1/3} = 1,5625 \langle H(t) \rangle \quad (3.53)$$

À cause des problèmes de dérive des centrales inertielles, le zéro absolu ne peut pas être utilisé, et les relations (3.52) & (3.53) non plus. Cependant, en recalant les mesures prises sur la période d'analyse en leur soustrayant $\langle H(t) \rangle$, la relation (3.52) devient utilisable. On dispose alors de deux relations pour estimer $H_{1/3}$.

En rentrant ces équations dans un filtre de Kalman classique, il est d'une part possible d'estimer proprement $H_{1/3}$ et d'autre part de quantifier ϵ_H la dérive de la centrale. On peut donc recalculer la mesure brute afin d'avoir une hauteur par rapport au zéro absolu. Avec pour éléments du filtre les matrices suivantes :

$$y = [\sigma_H \quad \bar{H}_q \quad \langle H \rangle] \quad H = \begin{bmatrix} \frac{4}{2} & \frac{1,4}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} H_{1/3} \\ \epsilon_H \\ \langle H \rangle \end{bmatrix} \quad F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{1,5625} & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

TABLE 3.6 – Matrices du filtre d'estimation de $H_{1/3}$.

La Table (3.7) permet de faire la correspondance entre l'échelle de Beaufort et l'échelle de description de l'état de la mer, standardisée par l'Organisation Météorologique Mondiale. Les hauteurs significatives sont tirées de la description du spectre de JONSWAP [Hasselmann *et al.*, 1973].

Toutefois, comme l'objectif premier est de pondérer les polaires de performance et si la centrale inertielle est de mauvaise qualité, il est alors préférable de travailler à partir de l'angle de tangage. Car premièrement, il ne dérive pas et deuxièmement, il représente une

Echelle de Beaufort				WMO Sea State					
Force	Termes	V_T (nds)		V_T (m/s)		$H_{1/3}$ (m)		Code	Termes
		min	max	min	max	min	max		
0	Calme	0	1	0,0	0,5	0	0	0	Miroir
1	Très légère brise	1	3	0,5	1,5	0	0,1	1	Ridée
2	Légère brise	4	6	2,1	3,1	0,1	0,5	2	Belle
3	Petite brise	7	10	3,6	5,1	0,5	1,25	3	Peu agitée
4	Jolie brise	11	16	5,7	8,2	1,25	2,5	4	Agitée
5	Bonne brise	17	21	8,7	10,8	2,5	4	5	Forte
6	Vent frais	22	27	11,3	13,9				
7	Grand frais	28	33	14,4	17,0				
8	Coup de vent	34	40	17,5	20,6	4	6	6	Très forte
9	Fort coup de vent	41	47	21,1	24,2				
10	Tempête	45	55	23,1	28,3	6	9	7	Grosse
11	Violente tempête	56	63	28,8	32,4	9	14	8	Très Grosse
12	Ouragan	64		32,9		14		9	Enorme

TABLE 3.7 – Échelle de Beaufort et état de mer correspondant.

bonne métrique de la résistance à l'avancement causée par les vagues. On utilisera alors la moyenne quadratique en ayant pris le soin préalable de soustraire à ces mesures la composante continue correspondant à la moyenne arithmétique.

3.4 Chaîne de reconstruction du vent réel

Cette section est consacrée aux étapes de la reconstruction du vent réel. Nous avons vu dans le premier chapitre, que le principe de base pour remonter au vent réel à partir des données brutes des capteurs, est de reconstruire ce que l'on appelle le triangle de vent. Cependant, nous avons démontré par la suite que cette reconstruction simpliste en deux dimensions ne prend pas en compte un grand nombre de phénomènes liés à la couche basse de l'atmosphère, ainsi qu'à l'attitude du bateau. Pire encore, cette définition du triangle de vent n'est bien souvent pas correcte, comme le montrent les exemples de la Figure (3.6). Nous allons commencer par détailler et critiquer la méthode aujourd'hui communément employée. Puis, proposer notre solution afin de corriger les reproches exposés. Avant d'exposer les étapes de notre proposition de reconstruction du vent réel, dans l'objectif d'appréhender l'enchaînement des événements, nous exposerons le processus inverse qui consiste à passer du vent dans sa définition météorologique, au signal transmit par le capteur.

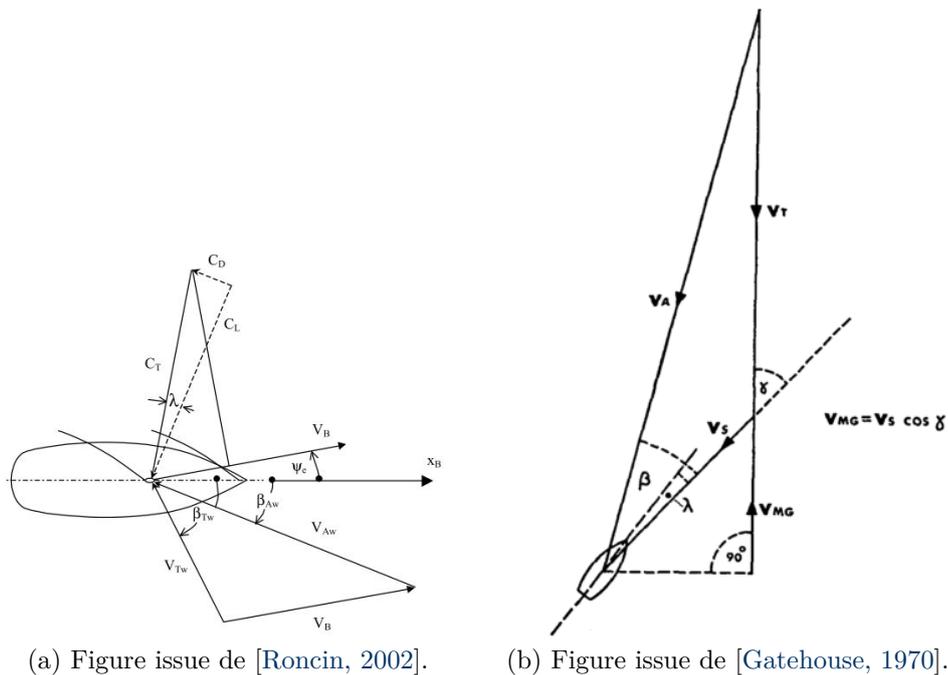


FIGURE 3.6 – Exemples de mauvaises prises en compte de l'angle de dérive dans le triangle de vent. (a) : l'angle de dérive est dessiné mais n'est pas pris en compte dans l'angle de vent réel. (b) : l'angle de dérive est pris en compte dans l'angle de vent réel mais aussi dans l'angle de vent apparent...

3.4.1 Méthodologie usuelle

3.4.1.1 Chaîne de reconstruction

La Figure (3.7) présente l'enchaînement des étapes de reconstruction du vent réel et du rétro-calcul du vent apparent le plus répandu aujourd'hui. Ce processus ne diffère que très peu entre les centrales des différents fabricants.

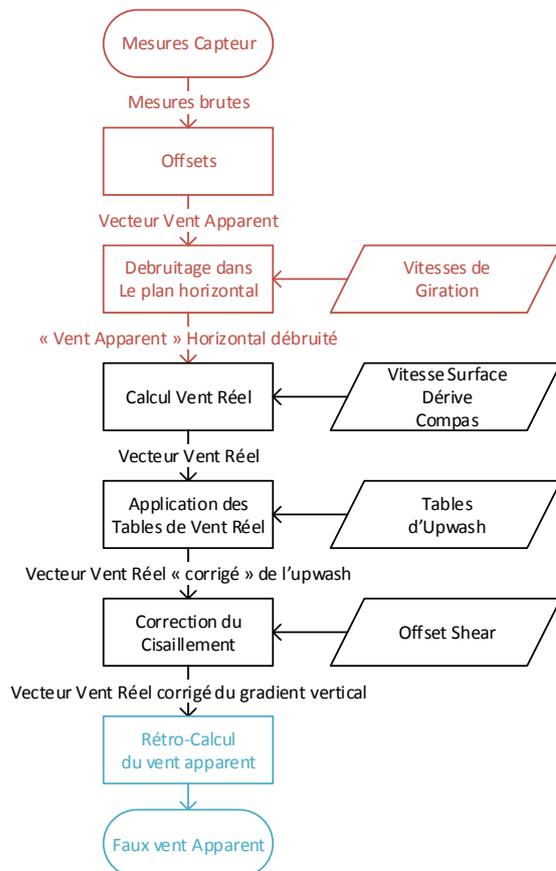


FIGURE 3.7 – Étapes de reconstruction du vent réel et de rétro-calcul du vent apparent aujourd'hui en application.

Les paragraphes suivants détaillent pourquoi cet enchaînement n'est pas satisfaisant.

3.4.1.2 Débruitage

La première erreur est effectuée au moment du débruitage du vent apparent. Cette étape consiste à soustraire de l'information transmise par le capteur, les mouvements de la tête de mât. L'une des erreurs rencontrée durant cette étape, concerne la détermination de la vitesse

de la tête de mât. Elle est parfois déterminée à partir des dérivées des angles de gîte et de tangage. Or, ce sont des angles d'Euler, définis dans la représentation de Tait-Bryan [Nautical Angles, 2016]. Donc, la dérivée de ces angles ne représente pas la vitesse de la tête de mât, ni dans le repère R_{BDyn} , ni dans le repère R_{Flat} . Pour retrouver la vitesse de la tête de mât dans le repère R_{BDyn} , il faut plutôt se référer directement aux informations provenant des gyroscopes.

La deuxième erreur commise sur cette étape de débruitage du vent apparent, est le fait que la correction soit souvent appliquée en deux dimensions, dans le repère horizontal. Or, ce n'est pas le vent apparent horizontal qui subit les mouvements de rotation du bateau, mais le vent perçu par le capteur, le vent effectif, défini dans le repère R_{BDyn} . C'est à cette représentation du vent qu'il faut soustraire les mouvements de la tête de mât.

La seconde mauvaise pratique de cette chaîne de mesure intervient au moment de l'application des tables de vent réel.

3.4.1.3 Tables de vent réel et Shear

Les tables de vent réel, permettent, en fonction de la force du vent réel et de l'amure du bateau (β_T), de rajouter un offset à l'information d'angle ou/et de vitesse de vent réel précédemment calculés. Ces tables ont été introduites dans l'objectif de corriger le phénomène d'upwash exposé dans la section 1.3.2. Ces corrections déterminées de manière empirique, sont appliquées sur le vecteur vent réel, alors que le phénomène s'applique sur le vent effectif. Il y a donc, en plus de la méthode approximative de détermination de ces tables, un problème de référentiel.

La correction du cisaillement est ensuite appliquée à la direction du vent réel via l'ajout d'un offset sur la direction, le plus couramment renseigné par l'utilisateur. Il doit correspondre au cisaillement du vent réel et permettre de faire correspondre les valeurs d'angle de vent apparent entre les deux amures. Cependant, cette étape n'est pas problématique du point de vue du vent réel. Elle l'est par contre lorsque l'on passe à l'étape de rétro-calcul du vent apparent.

3.4.1.4 Rétro-calcul du vent apparent

Cette étape consiste à reconstruire le vent apparent en ayant comme information initiale le vecteur vent réel, puis en lui soustrayant le vecteur de déplacement surface. L'idée première est de faire profiter au vent apparent les corrections apportées avec les tables de vent réel et de cisaillement. Cette pratique est à proscrire, car d'une part il y a un problème de changement de référentiel qui n'est pas pris en compte, et d'autre part, nous avons vu dans le paragraphe précédent que la correction de l'upwash sur le vent réel est une erreur. De plus, de par leurs

méthodes de construction expérimentales, les tables d'upwash comportent des corrections dues à d'autres phénomènes, comme le vrillage du mât, les erreurs d'estimation de la dérive et les mauvaises calibrations des capteurs. Alors, en rétro-calculant le vent apparent, on y retrouve ces erreurs. Il n'est par exemple pas normal de retrouver une composante de dérive dans l'angle de vent apparent.

Le second reproche porté à cette technique du rétro-calcul, est la prise en compte du cisaillement. Il n'est pas logique de vouloir afficher un angle de vent apparent symétrique entre les deux amures si en pratique ce n'est pas le cas. Nous avons vu que le cisaillement du vent réel est un phénomène normal. Le masquer va à l'encontre de la logique et n'aidera pas à la performance du bateau.

Nous concluons notre critique des méthodes actuelles par la technique employée pour traiter la direction du vent réel durant les virements de bord.

3.4.1.5 Correction de la direction du vent réel durant le virement

Aujourd'hui, la direction du vent réel calculée par les centrales de navigation haut de gamme, n'est toujours pas calculée correctement durant les virements. Lorsque le bateau vire, la direction du vent réel calculée a tendance à s'écarter d'une dizaine de degrés de sa valeur initiale pendant une douzaine de secondes, avant de revenir doucement vers la bonne valeur. Ce comportement est dû aux différents déphasages des signaux utilisés pour calculer la direction. Le propos ici n'est pas de discuter la méthode permettant de recalibrer ces déphasages, mais de commenter la technique aujourd'hui employée pour contrer ce mauvais comportement.

La centrale de navigation Ockam [McCurdy, 2008], critique l'approche de Bravo [Bravo, 1999] qui "fige" le vent réel durant les manœuvres, en augmentant significativement le coefficient de filtrage à ce moment précis. En effet, le vent réel est filtré par une moyenne exponentielle dont le coefficient est proportionnel à la vitesse de giration du bateau. Ockam propose aussi d'utiliser la vitesse de giration, mais pas pour pondérer un filtre passe-bas, pour l'ajouter directement à la direction du vent réel.

Notre proposition, bien qu'utilisant également la vitesse de giration du bateau, a une approche différente. Au lieu de pondérer un filtre moyenneur, la direction du vent réel est filtrée par un filtre adaptatif. Ainsi, les mesures sont plus ou moins intégrées dans la prédiction en fonction du bruit de mesure. L'application à la problématique de la direction du vent réel durant le virement est la suivante. Nous utilisons les équations du filtre de Kalman exposées dans la section 2.6. Cependant, comme notre vecteur de mesure et d'estimation se limite à une dimension, alors les matrices de transitions et d'observations F & H sont réduites à 1. Ainsi,

le filtre se simplifie de la sorte :

$$\text{Prédiction : } \begin{cases} \hat{X}_{k|k-1} = \hat{X}_{k-1|k-1} \\ P_{k|k-1} = P_{k-1|k-1} + Q_k \end{cases} \quad \text{Mise à jour : } \begin{cases} K_k = \frac{P_{k|k-1}}{P_{k|k-1} + R_k} \\ \hat{X}_{k|k} = \hat{X}_{k|k-1} + K_k(y_k - \hat{X}_{k|k-1}) \\ P_{k|k} = P_{k|k-1}(1 - K_k) \end{cases} \quad (3.54)$$

Ces équations sont beaucoup plus simples et moins coûteuses que la version du filtre de Kalman classique lorsque le vecteur d'état est de dimension supérieure à 1, car il n'y a pas besoin de faire d'inversion de matrices. Le bruit de modèle Q sera alors l'équivalent du coefficient de filtrage réglé par l'utilisateur et utilisé précédemment dans les filtres exponentiels. Le bruit de mesure R , sera lui fonction de l'erreur de la chaîne de reconstruction du vent réel. En l'occurrence, pour corriger les erreurs durant le virement, on choisira de pondérer R par la vitesse de rotation du bateau.

On peut appliquer le même principe en ajustant le bruit de mesure à d'autres paramètres caractérisant cette erreur de mesure. Par exemple, l'accélération angulaire qui caractérise le moment où le bateau tape dans une vague, ce qui altère la mesure de l'aérien.

Maintenant que nous avons exposé les reproches portés à la méthode actuelle, nous allons lister les phénomènes dans leur ordre d'apparition, afin de détailler notre proposition dans un second temps.

3.4.2 Chronologie du passage du vent météo au signal fourni par l'aérien

En vue de traiter individuellement les perturbations, il faut d'une part identifier et isoler les correctifs, mais également les appliquer au bon moment lors de la reconstruction du vent réel. La Figure (3.8) détaille l'enchaînement des transformations subies par le vent, lorsque l'on passe de la définition du vent réel météo au signal mesuré par le capteur.

3.4.2.1 A : Changement d'altitude

Le vent fourni par la météo est spécifié pour une altitude donnée, z_{ref} , généralement 10 mètres. Cette étape permet de redéfinir le vent réel fond à l'altitude du capteur. Pour cela il faut prendre en compte le gradient vertical du vent réel.

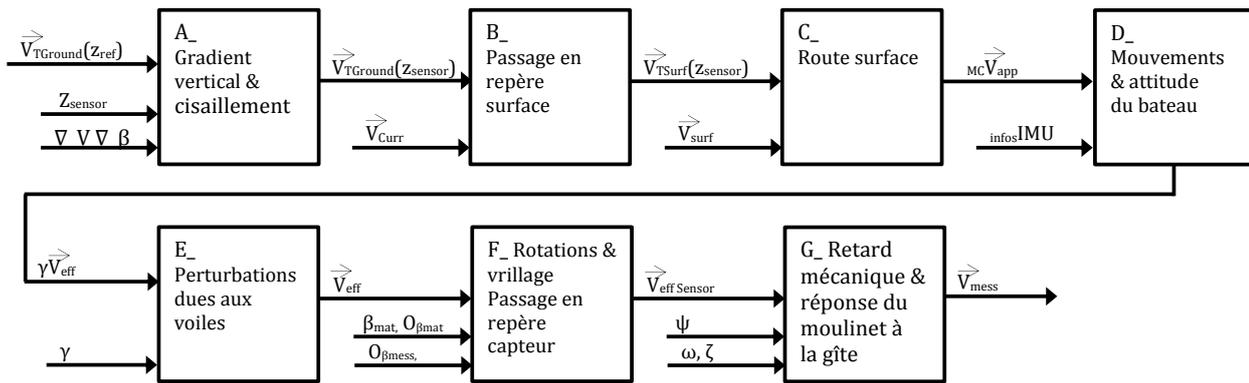


FIGURE 3.8 – Transformations subies par le vent depuis sa définition météorologique à 10 mètres d'altitude jusqu'au signal renvoyé par le capteur aérien.

3.4.2.2 B : Passage en repère surface

Il faut ensuite changer de référentiel, pour se placer dans le repère surface et prendre en compte le courant. On observe alors le vecteur vent réel surface qui souffle au niveau de l'aérien, du point de vue d'un observateur qui dérive avec le courant.

3.4.2.3 C : Vitesse du bateau

Cette étape introduit la route surface du bateau, mais sans prendre en compte les mouvements de la tête de mât, ni de l'attitude du voilier. Le vent est donc défini dans le repère R_{BFlat} . Alors, à l'altitude z_{sensor} , on observe le vent apparent dans sa définition horizontale, non perturbé des mouvements du bateau, ni des effets d'upwash.

3.4.2.4 D : Mouvements & attitude du bateau

La dynamique du bateau est introduite à ce moment, son attitude statique et dynamique "bruite" le vent apparent. On passe alors dans le repère R_{BDyn} . Le vecteur vent est alors dans sa définition du vent effectif (dans le sens perçu/subi par les profils aérodynamiques), mais sans prendre en compte la perturbation du phénomène d'upwash.

3.4.2.5 E : Upwash

Ce n'est seulement qu'à cette étape qu'intervient la perturbation d'upwash, quand le vent et le profil aérodynamique sont définis dans le même référentiel. Alors, le champ de vent est modifié par la portance du profil aérodynamique et les senseurs du capteur subissent le vent effectif.

3.4.2.6 F : Vrillage & offsets

Le référentiel capteur et R_{BDyn} ne sont pas alignés. C'est à cette étape qu'interviennent les perturbations qui modifient cet alignement. Comme par exemple le vrillage du mât et l'offset de la girouette, ou encore l'angle de rotation et de bascule du mât.

3.4.2.7 G : Fonction de transfert du capteur

Le signal numérisé par le capteur ne correspond pas au vent effectif. Il est modifié par la fonction de transfert des parties mécaniques (cf. Chapitre 2).

Maintenant que nous avons détaillé l'ordre d'apparition des événements à prendre en compte lors du passage de la définition du vent réel météo au signal numérisé de l'aérien, nous allons pouvoir définir le chemin inverse : la méthode de reconstruction du vent réel que l'on appliquera dans la centrale de navigation.

3.4.3 Détail de la chaîne de reconstruction

La Figure (3.9) présente notre proposition d'enchaînement des étapes pour remonter aux informations de vent réel surface et fond, en partant du signal numérisé par l'aérien.

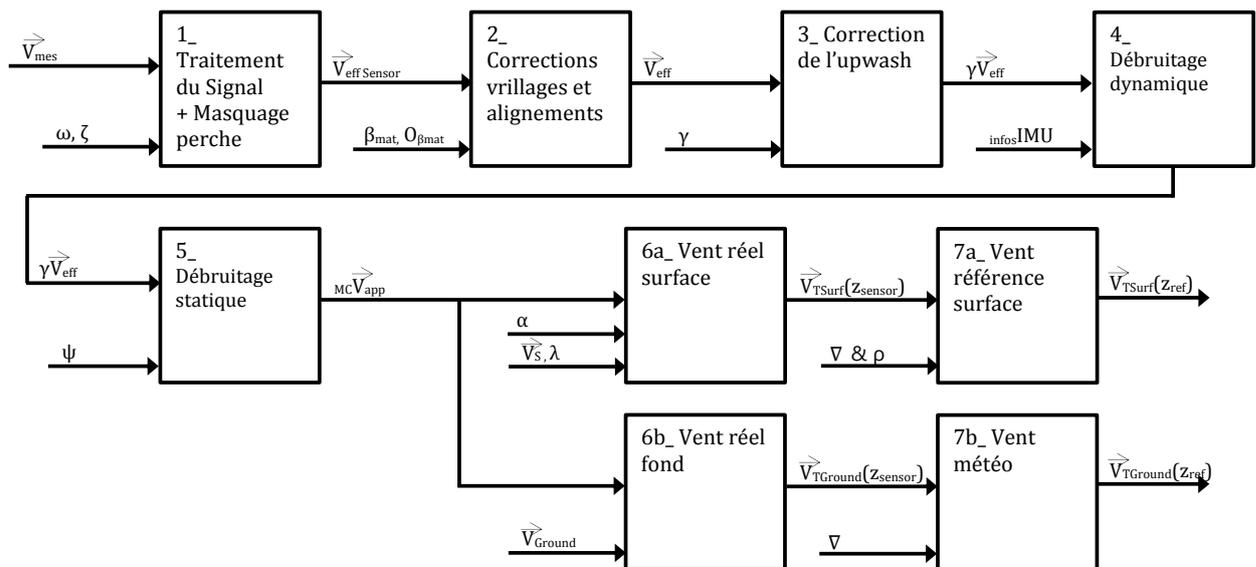


FIGURE 3.9 – Proposition d'enchaînement des étapes de reconstruction du vent réel.

3.4.3.1 1 : Traitement du signal prédictif

Il s'agit de la première étape, où l'on travaille directement avec les mesures brutes de l'aérien. C'est la mise en application des travaux exposés dans la section 2.6, dont l'objectif est de corriger les erreurs induites par le comportement mécanique des senseurs. On en profite également pour ensuite corriger le masquage du moulinet par la perche (cf. section 2.3.9).

3.4.3.2 2 : Offsets et vrillage

C'est l'inverse de l'étape **F**. Elle corrige les problèmes d'alignement du capteur et de vrillage du mât, pour retranscrire le vent effectif dans le repère bateau.

3.4.3.3 3 : Correction de l'upwash

L'upwash s'applique dans le même référentiel que les profils aérodynamiques. C'est donc à ce moment qu'il faut appliquer les corrections détaillées dans la section 3.3.3.

3.4.3.4 4 : Débruitage dynamique

L'objectif est de soustraire au vecteur \vec{V}_{eff} , les mouvements du capteur dans le référentiel bateau. On obtient alors un vent effectif "statique". On s'aidera des vitesses de giration de la plateforme et de la distance entre le capteur et le centre de giration du bateau.

Une autre approche est possible, en positionnant une centrale inertielle directement dans ou à proximité immédiate du capteur aérien, en tête de mât. Comme expliqué par les travaux présentés dans ces deux rapports de stage [Horel, 2011] & [Gerster, 2016], nous avons testé cette approche avec des composants de premier prix. Suite à ces tests, nous préférons rester sur l'approche classique avec la centrale d'attitude positionnée en pied de mât, et avons développé un nouveau produit d'entrée de gamme dédié à cette tâche (cf. Annexe D).

3.4.3.5 5 : Débruitage statique

On passe ici du vent effectif au vent apparent horizontal. On obtiendra alors l'angle de vent apparent β_{app} à partir de β_{eff} et des angles de gîte et de tangage du bateau à l'aide de la relation (A.11). La vitesse du vent apparent V_{app} sera elle obtenue à l'aide de la courbe de réponse de l'anémomètre (cf. section 2.3.5) et de l'angle d'attaque vertical ψ , obtenu à partir de l'attitude du bateau et de la relation (A.15).

On peut ensuite utiliser le vecteur de vent apparent horizontal débruité des mouvements de la tête de mât pour, soit calculer le vent réel surface, soit calculer le vent réel fond.

3.4.3.6 6a : Vent réel surface

Le vecteur vent apparent est maintenant dans le repère horizontal et "débruité"/"nettoyé" des mouvements du bateau. On peut donc remonter au vent réel en appliquant la définition standard en deux dimensions du triangle de vent. C'est-à-dire en appliquant l'addition vectorielle de la route surface, qui prend en compte la dérive du bateau.

3.4.3.7 7a : Vent référence surface

Le vent réel surface peut être ramené à l'altitude souhaitée, par exemple à la hauteur du centre de poussée vélique. Ce changement de référence est surtout intéressant pour l'angle de vent réel que l'on va envoyer au pilote automatique. C'est également maintenant que l'on peut pondérer la force du vent réel avec la méthode exposée dans la section 3.3.2, afin de nourrir les calculs de performance.

3.4.3.8 6b : Vent réel fond

Comme pour le vent réel surface, cette étape reconstruit le triangle de vent en deux dimensions, mais avec plus de facilité car elle utilise le vecteur de déplacement fond, fourni par le récepteur GNSS, ce qui permet de s'affranchir de l'angle de dérive.

3.4.3.9 7b : Vent météo

Afin de pouvoir comparer le vent réel fond aux prévisions des fichiers météo, il faut le transposer à la même altitude en s'aidant des gradients verticaux et des relations exposées dans la section 3.3.1.

3.4.4 Conclusion

Nous avons vu dans cette section que la reconstruction du vent réel n'est pas triviale. Il faut en effet faire attention à, d'une part, appliquer les bonnes méthodes de correction, mais surtout de le faire dans le bon référentiel. Ces travaux nous montrent également l'apparition des capteurs et des variables à plusieurs reprises dans la chaîne de reconstruction. Cette forte corrélation entre les différentes variables mesurées et calculées par la centrale de navigation,

a une première fois été exposée avec la Table (1.5). Elle indique que ces calculs profiteraient à être implantés dans un filtre qui minimise la covariance des erreurs, comme par exemple le filtre de Kalman. Une autre solution envisageable est d'utiliser un filtre à particule. Un exemple appliqué à la mesure du vent est détaillé dans [Cabrera-Gámez *et al.*, 2016]. Cependant leur méthode nécessite encore des améliorations.

3.5 Conclusion

Nous avons vu dans ce 3^{ème} chapitre les problématiques liées à la reconstruction du vent réel, tout d'abord en s'intéressant aux normes et définitions des métriques qui lui sont associées. On a alors pu se rendre compte que même des définitions simples comme la moyenne, doivent être utilisées avec précautions. Notamment en adaptant le type de moyenne au type de variable sur laquelle elles s'appliquent.

La deuxième section de ce chapitre nous a permis d'apporter des solutions afin de prendre en compte les perturbations qui s'appliquent au vent réel et que l'on se doit de prendre en considération lorsque l'on cherche à qualifier la performance du bateau, mais aussi lorsque l'on reconstruit le vent réel à partir des mesures effectuées par les capteurs embarqués sur le bateau.

C'est sur cette méthode de reconstruction du vent réel que la dernière section de ce chapitre s'est concentrée. Nous y avons premièrement vu que les méthodes actuelles ne sont pas satisfaisantes, notamment parce que les corrections ne sont pas appliquées dans les bons référentiels. Ce chapitre s'est clôturé par notre proposition de reconstruction du vent réel, qui prend en compte les méthodes de correction précédemment décrites dans le manuscrit.

Maintenant que nous avons proposé des méthodes pour, d'une part, mieux mesurer le vent apparent et d'autre part, mieux reconstruire le vent réel, nous allons pouvoir dans le chapitre suivant, exposer les nouvelles applications envisageables grâce à ces améliorations.

Application au pilotage automatique

Sommaire

4.1	Introduction	174
4.2	Mode Rafale	176
4.2.1	Contexte	176
4.2.2	Fonctionnement	176
4.2.2.1	Secteurs	176
4.2.2.2	Actions	176
4.2.3	Évolutions	178
4.3	Mode surf	179
4.3.1	Contexte	179
4.3.2	Objectif	179
4.3.3	Fonctionnement	181
4.3.4	Résultats	182
4.4	ePenons	183
4.4.1	Introduction	183
4.4.2	Intégration au pilotage automatique	184
4.4.3	Conclusion	186
4.5	Conclusion	188

4.1 Introduction

Ce 4^{ème} chapitre est consacré à quelques unes des innovations apportées au pilote automatique. Ces travaux s'inscrivent connexement à l'objectif principal de cette thèse, en s'attaquant à la performance du bateau lorsqu'il est sous pilote automatique. Ces travaux ont été réalisés en parallèle des contributions principales de cette thèse. Nous ne ferons donc dans ce chapitre qu'une présentation, permettant d'appréhender les problématiques et les enjeux du pilotage automatique, sans détailler plus avant les travaux.

nke propose depuis 1994 un pilote automatique aujourd'hui encore considéré comme étant très performant. Les travaux que nous présentons dans ce chapitre ont été mis en œuvre sur la version haut de gamme disposant d'une centrale inertielle. La version profitant de ces avancées technologiques est considérée comme étant le meilleur pilote aujourd'hui disponible sur le marché et a reçu le prix de l'innovation 2015, décerné par la fédération des industries nautiques et la fédération française de voile.

Les deux premières sections de ce chapitre sont consacrées à deux nouveaux modes de pilotage faisant partie de la nouvelle catégorie des "Modes Super". Jusqu'à aujourd'hui, le but d'un pilote automatique était de suivre une consigne de cap, d'angle de vent apparent, ou encore d'angle de vent réel (cf. Figure (4.1)). Nous verrons que le pilote est maintenant capable de déterminer quelle est la consigne la plus adéquate. Enfin, la dernière section traitera de l'intégration de penons électroniques.

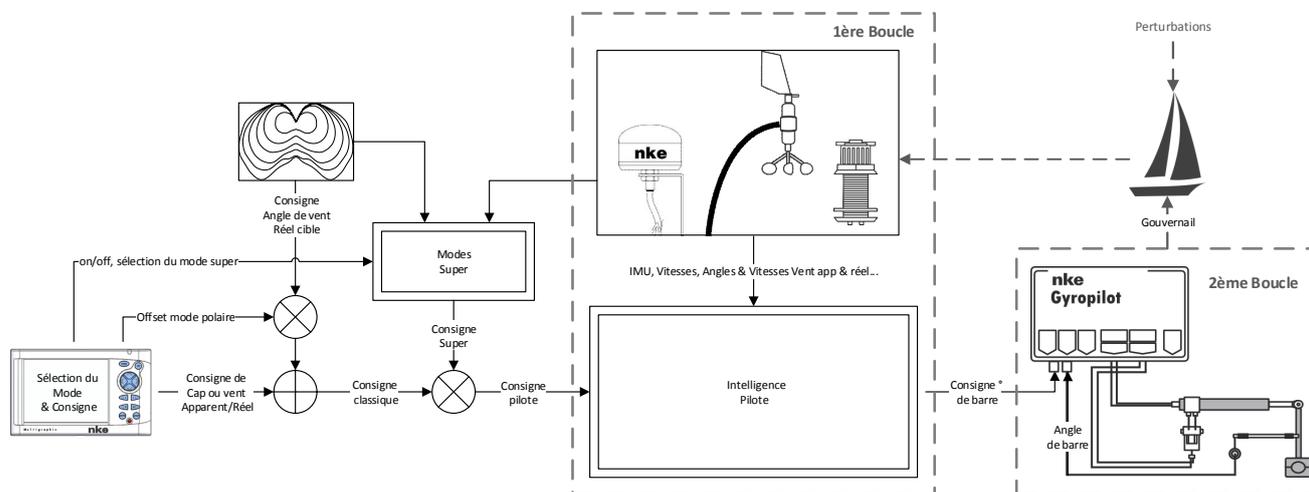


FIGURE 4.1 – Synopsis du fonctionnement et des flux d'informations du pilote automatique nke, avec l'intégration des algorithmes "Super".

Le pilote automatique peut se résumer en deux boucles d'asservissement successives. La seconde gère la puissance électrique, envoyée au vérin ou à la pompe hydraulique pour actionner la barre. C'est une boucle d'asservissement assez simple, avec un seul retour d'information. Son rôle est de faire en sorte que l'angle de barre, mesuré par le capteur

d'angle de barre, coïncide avec la consigne d'angle de barre spécifiée. Cette consigne d'angle de barre correspond à la sortie de la première boucle d'asservissement. C'est dans cette première boucle que réside le savoir faire de l'intelligence pilote. Son rôle est de choisir l'angle de barre qui va permettre au bateau de respecter la consigne spécifiée. Cette consigne peut être, en fonction du mode de pilotage sélectionné par l'utilisateur, soit un cap à suivre, soit un angle de vent apparent ou réel à respecter. Afin de respecter cette consigne, l'algorithme s'aide des informations de vitesse, de dérive, de vent apparent et réel, de l'attitude statique et dynamique du bateau... Nous avons amélioré cet algorithme en le ré-écrivant afin qu'il prenne en compte les caractéristiques du bateau, spécifiées par l'utilisateur lors de l'installation.

La principale difficulté que rencontre cette boucle d'asservissement réside dans le fait qu'elle doit contrôler un système dont la fonction de transfert est variable et inconnue. En effet, l'état de l'art sur la simulation d'un bateau dans les vagues, ne permet pas à ce jour de reproduire fidèlement le comportement du voilier. De plus, l'utilisation de ce type de modèle nécessiterait de mesurer des paramètres supplémentaires sur le bateau, comme par exemple les longueurs et charges d'écoutes. Enfin, même si toutes les variables du système sont mesurées et connues, il reste à modéliser l'effort sur les voiles. Les voiles étant des structures souples, leurs fonctions de transfert sont très variables. Il faut alors aborder le problème de l'interaction fluide-structure, qui reste un domaine aujourd'hui encore incertain, même en post-traitement [Deparday, 2016]. Bien que nous ayons contribué à l'amélioration de cette boucle d'asservissement, nous ne détaillerons pas dans la suite de ce chapitre son fonctionnement.

Les innovations présentées dans ce chapitre concernent les "Modes Super", qui interviennent en sur-couche des modes de pilotage classiques. Ces modes permettent de modifier la consigne spécifiée par l'utilisateur (cf. Figure (4.1)), afin de maximiser la performance du bateau (Mode Surf), ou pour respecter des critères de sécurité (Mode Rafale), comme nous le verrons dans les deux premières sections. Ou encore, pour intégrer un nouveau type de capteur pour lequel nous détaillerons les résultats obtenus dans la dernière section de ce chapitre.

4.2 Mode Rafale

4.2.1 Contexte

C'est le premier "Mode Super" à avoir été développé. Il a été pensé uniquement dans un but sécuritaire : donner une stratégie d'évitement au pilote lors d'une survente. Il n'est pas pensé pour optimiser la trajectoire et la vitesse du bateau. Il peut être activé en sur-couche de n'importe quel mode de pilotage classique. Cette fonctionnalité vient résoudre les problèmes de sécurité lorsque la force du vent augmente brusquement. Quand un bateau est en course, le skipper règle et adapte la voilure à la force du vent moyen, afin de maximiser la vitesse du bateau. Cependant, si le vent augmente, alors le bateau se retrouve en sur-puissance. Le skipper doit soulager le gréement en choquant les écoutes. S'il n'a pas le temps de le faire parce qu'il dort, ou bien parce qu'il est occupé sur une autre tâche, alors le bateau peut se coucher sur l'eau, ou bien se retourner dans le cas d'un multicoque. Les modes de pilotages classiques ne prennent pas en compte les rafales. C'est l'objectif de cette nouvelle fonctionnalité, qui doit proposer une stratégie de changement de trajectoire afin de minimiser l'effet de la rafale sur le bateau.

4.2.2 Fonctionnement

Le comportement du mode est spécifié dans une table que l'utilisateur peut ajuster pour adapter le comportement aux caractéristiques de son bateau et à ses préférences (cf. Table (4.1)).

4.2.2.1 Secteurs

La table est composée de 6 secteurs, chacun disposant de 6 actions. Le fait d'avoir différents secteurs permet de définir différentes stratégies, en fonction de l'angle de navigation du bateau par rapport à la direction du vent réel. Par exemple : lofer quand on est au près, abattre quand on est au portant et ne rien faire au travers (section 1,4 et 6 de la Table (4.1))

4.2.2.2 Actions

La vitesse du vent réel est moyennée sur 10 minutes, c'est la vitesse de référence. Ensuite, l'amplitude de la rafale est déterminée d'après la méthode détaillée dans la section 3.2.2.4. Si l'amplitude de cette rafale dépasse l'un des seuils de la section courante, alors est ajoutée à la consigne de pilotage, la correction correspondante spécifiée dans la table.

β_T	Rafale	Consigne Super	Tempo N-1	Tempo New Consigne
30	-	0	-	-
30	-	0	-	-
30	-	0	-	-
30	-	0	-	-
30	-	0	-	-
30	-	0	-	-
50	2	-1	0'20"	5'00"
50	4	-2	0'20"	4'30"
50	6	-4	0'20"	4'00"
50	8	-5	0'30"	3'30"
50	10	-7	0'30"	1'30"
50	12	-8	0'30"	1'00"
80	2	-2	0'20"	5'00"
80	4	-4	0'20"	4'30"
80	6	-7	0'20"	4'00"
80	8	-10	0'30"	3'30"
80	10	-13	0'30"	1'30"
80	12	-16	0'30"	1'00"
110	-	0	-	-
110	-	0	-	-
110	-	0	-	-
110	-	0	-	-
110	-	0	-	-
110	-	0	-	-
165	2	2	0'20"	5'00"
165	4	4	0'20"	4'30"
165	6	5	0'20"	4'00"
165	8	8	0'30"	3'30"
165	10	10	0'30"	1'30"
165	12	12	0'30"	1'00"
180	-	0	-	-
180	-	0	-	-
180	-	0	-	-
180	-	0	-	-
180	-	0	-	-
180	-	0	-	-

TABLE 4.1 – Exemple de table rafale. Pour qu'une action soit active, il faut que la rafale soit supérieure au champ "Rafale". Si c'est le cas, alors l'offset de la colonne "Consigne Super" correspondant est appliqué à la consigne de pilotage (cf. Figure (4.1)), et les timers sont activés. Exemple : On navigue à 150° du vent réel, la section active est la 4^{ème} : ($110 < 150 < 165$). Dès qu'une rafale de 2nds est détectée, on va demander au pilote d'abattre de 2° , et ainsi de suite pour les rafales plus importantes.

Chaque action est également accompagnée d'une temporisation. C'est-à-dire que si une action est activée, même si la rafale n'a duré qu'une seconde, l'action doit être marquée au moins le temps spécifié par la temporisation (champ "Tempo N-1"). Puis, revenir progressivement à la valeur courante de la consigne. Par contre si le vent n'a toujours pas faibli au bout de la temporisation "Tempo New Consigne", alors, on ne reviendra pas à la consigne initiale.

À chaque activation, montée ou descente d'action, les temporisations sont remises à zéro. Pour redescendre d'une action, il faut que la rafale soit retombée au niveau inférieur et que la temporisation "Tempo N-1" soit écoulée.

4.2.3 Évolutions

Cette méthode a prouvé son bon fonctionnement lors de deux tours du monde et d'une dizaine de transatlantiques. Cependant, nous avons remarqué que les valeurs seuils ne sont pas adaptées à toutes les forces de vent. En effet, subir une rafale de 5*nds* de vent dans 25*nds* de vent réel établi n'est pas la même chose que subir la même augmentation de 5*nds* dans 10*nds* de vent établi. On a dans le premier cas une augmentation de 20% de la vitesse et dans le second cas 50%. Ce qui, en terme d'énergie, représente une augmentation de +171% dans le premier cas, contre +337% dans le second. On linéarisera alors l'influence des rafales en travaillant sur l'augmentation en terme d'énergie en se basant sur la méthode décrite dans la section 3.3.2.4. On préférera également utiliser une moyenne quadratique pour déterminer la référence de vitesse de vent réel, plutôt qu'une moyenne arithmétique.

Intéressons-nous maintenant au second "Mode Super" qui est lui orienté vers la performance.

4.3 Mode surf

4.3.1 Contexte

Comme le Mode Rafale, le Mode Surf est un "Super Mode" : il vient modifier la consigne spécifiée au pilote. Contrairement au Mode Rafale, cette modification intervient dans l'objectif d'améliorer la performance du bateau. Cette innovation a fait l'objet du premier dépôt de brevet concernant le pilote automatique nke [Kerhascoët, 2015].

Le pilote HR montre un réel gain de performance dans la conduite du bateau. Ce gain de performance est principalement dû au fait qu'il dispose d'informations vent débruitées des mouvements de gîte et de tangage. La centrale inertielle permet également au pilote de prendre en compte les moindres mouvements du bateau dans les 3 dimensions, contrairement au Gyropilote qui ne dispose que d'un gyromètre un axe. Le pilote HR possède à ce jour plusieurs modes de pilotage : cap vrai, vent apparent, vent réel, polaire et barre. Ces modes prennent tous en entrée une référence provenant :

- d'un capteur primaire
 - Cap vrai : compas,
 - Angle Vent Apparent : girouette,
- d'une donnée calculée :
 - Vent réel : β_T calculé à partir des capteurs de l'aérien, du speedomètre et de la dérive,
 - Polaire : comme le mode vent réel mais la consigne est fournie automatiquement par la polaire de performance.

Pour les références en capteur primaire (cap vrai et vent apparent) le pilote est directement branché sur le capteur physique (en simplifiant). On peut dire qu'il n'y a pas de multiplexage au niveau des types de référence. Pour le mode vent réel, il est possible de rajouter de la composante compas dans la consigne (c'est le même principe pour le mode Polaire qui est en fait un mode vent réel avec une consigne « intelligente »). C'est ce que l'on fait en augmentant le paramètre "Filtrage Vent". De ce fait, si la direction du vent change brutalement, le pilote va progressivement venir sur la consigne car il va avoir tendance à vouloir suivre un cap constant (comme en mode cap vrai).

4.3.2 Objectif

Comme nous venons de le voir, le Pilote HR ne sait pas multiplexer deux références pour fournir une consigne. Il ne le fait que partiellement en mode vent, avec le paramètre "Filtrage Vent" qui rajoute du compas dans la consigne.

L'objectif du mode surf est de rajouter une composante d'angle de vent apparent dans la consigne pour le mode vent réel et polaire.

En effet, sur les bateaux rapides, notamment au portant, les variations de vitesses surfaces sont importantes (surfs, risées...). Ce qui implique des variations significatives d'angle de vent apparent, et quand le skipper barre, des changements de trajectoires pour accompagner le bateau dans les surfs et les relances. Lors de ces changements de trajectoires l'angle de vent apparent reste quasiment constant, c'est d'ailleurs le but de la manœuvre (sauf quand le barreur exagère l'abattée pour faire du gain sous le vent, ou bien quand il relance excessivement).

Les bateaux rapides, avec des voiles "plates", naviguent au portant avec des angles de vent apparent très faibles, de l'ordre de $50 - 70^\circ$. Lorsque le Pilote HR est en mode vent apparent, les performances sont très bonnes : quand le bateau part en surf, l'angle de vent apparent diminue et le pilote abat afin de suivre sa consigne. Puis, il lofe en fin de surf quand le bateau commence à ralentir et le vent apparent à s'ouvrir, exactement comme le ferait un barreur expérimenté. On comprend alors que suivre l'angle de vent apparent au portant permet d'avoir une conduite performante.

Le problème est qu'il est en pratique impossible de laisser le pilote en mode vent apparent au portant. En effet, si le bateau ralentit trop fort (par exemple lors d'un planté dans une vague), le pilote va alors lofer en grand pour rattraper l'angle de vent apparent qui vient d'augmenter. Si le bateau n'accélère pas assez vite, le pilote va continuer à lofer et dépasser les allures portantes pour se retrouver au près.

Piloter en mode vent apparent au portant est donc instable. C'est pour résoudre cette instabilité que le mode vent réel été développé en 1991. Le pilote n'est alors plus sensible aux variations et instabilités du vent apparent dues aux accélérations/décélérations.

En mode Vent Réel, lorsque le bateau part dans un surf, le pilote est censé aller tout droit, conserver la même trajectoire. La direction du vent réel n'a pas bougé, seulement le vent apparent. En pratique, notamment avec le vieux GyroPilote, le retard des capteurs (principalement du fait du speedomètre) implique que le calcul du vent réel est légèrement faussé. L'angle de vent réel va donc artificiellement augmenter et le pilote abat, puis relofer à la fin du surf. Avec le GyroPilote, en mode vent réel, on a donc l'impression que le pilote abat dans les surfs puis relofe pour relancer. Mais ce comportement est une "erreur" du point de vue de l'algorithme : c'est une heureuse combinaison de retards qui fait que ce comportement hasardeux est le bienvenu. Si, en général, ce phénomène est à peu près bon au niveau du timing et de l'amplitude, il est parfois déphasé. De plus, il est impossible pour l'utilisateur de régler ce comportement (à moins de jouer sur le filtrage du speedomètre) et encore moins de le contrôler.

Le Processeur HR scrute les capteurs primaires à $25Hz$, dans le but d'avoir le moins de retard possible au niveau des mesures primaires. Le processeur, contrairement au GyroPilote, est donc capable de calculer un vent stable en temps réel lorsque le bateau accélère, décélère, change de trajectoire. Alors, lorsque le PiloteHR est en mode vent réel, comme son calcul du

triangle de vent est juste et rapide, lorsque le bateau part en surf, le pilote conserve la même trajectoire (c'est d'autant plus vrai lorsque l'on a ajouté du "Filtrage Vent" (cf. contexte)). En revanche, comme l'angle de vent apparent se referme avec l'accélération, les voiles ne sont plus correctement réglées et se retrouvent trop choquées, jusqu'à parfois faseyer, et le bateau ralentit fortement. En exagérant pour simplifier l'explication, le bateau va tout droit (comme en mode compas). C'est donc là qu'intervient le Mode Surf, en rajoutant une composante de vent apparent dans la consigne de pilotage, qui va permettre d'abattre dans les surfs puis de relancer, à la manière d'un vrai barreur.

4.3.3 Fonctionnement

Le principe est de rajouter un offset variable à la consigne courante, de façon temporaire ou durable.

Par principe de fonctionnement, le Mode Surf n'est pas activable en mode vent apparent. Il est pensé pour fonctionner en mode vent réel et donc également en mode polaire. Après les tests en navigation, il s'est avéré intéressant dans certaines conditions, d'activer ce mode surf quand le pilote est en mode compas.

Une explication simplifiée de son fonctionnement peut être la suivante :

Commencer par moyenner l'angle de vent apparent brut sur une période assez longue (environ 120 secondes), que l'on nommera $\beta_{app}LT$. Puis, moyenner l'angle de vent apparent brut sur une période courte (environ 5 secondes), que l'on nommera $\beta_{app}I$.

Lorsque le bateau est en régime stable, quand il n'est pas en surf, sur le long terme : à l'angle de vent réel cible du pilote correspond un angle de vent apparent. C'est celui auquel correspond $\beta_{app}LT$, celui pour lequel les voiles sont réglées. Puis, lorsque le bateau va accélérer/décélérer, $\beta_{app}I$ va évoluer mais pas $\beta_{app}LT$ car sa période de filtrage est bien plus grande. On peut alors faire la différence $\beta_{app}LT - \beta_{app}I = \epsilon_{\beta_{app}}$. Ainsi, afin que le bateau garde un angle de vent apparent constant (et que les voiles restent bien réglées), il faut (en tenant compte du signe) ajouter $\epsilon_{\beta_{app}}$ à la consigne d'angle de vent réel.

Cet ajout sera pondéré par un réglage de gain, afin que l'utilisateur puisse régler "l'agressivité" du Mode Surf et ainsi choisir s'il souhaite avoir un pilote qui abat et relance franchement dans les surfs, ou au contraire un comportement plus doux. Un autre paramètre est accessible par l'utilisateur avancé. Il s'agit de l'amplitude maximale que le Mode Surf peut appliquer à la consigne. Il est par défaut réglé sur 10° , ainsi, le pilote ne fera pas d'écarts de route supérieurs à cette valeur.

C'est donc un principe de fonctionnement robuste car, d'une part il repose sur une information provenant d'un capteur primaire et simple, et d'autre part, car il ne demande aucune calibration préalable et est insensible aux problèmes d'offsets et de dérive.

4.3.4 Résultats

Regardons les résultats obtenus en compétition sur le mini 6.50 N°800 qui a gagné la mini-transat 2015. Ces enregistrements sont intéressants car durant la 2^{ème} nuit, le skipper s'est endormi durant 8 heures et le Mode Surf est resté activé dans des conditions de vent soutenues. Le bateau ayant quant à lui gagné 30 milles sur ses concurrents cette nuit-là.

Le pilote automatique était réglé en mode vent réel avec une consigne à 150°. La force du vent est montée progressivement de 19 à 23*nds*. Le bateau avait une vitesse fond moyenne de 12*nds* sur cette période de 8 heures, avec plusieurs pointes de vitesse supérieures à 21*nds*. La consigne super associée au Mode Surf a une valeur moyenne de 0.67° et un écart type 3.3°. Cela veut dire que le Mode Surf a passé plus de temps à glisser dans les surfs qu'à relancer par la suite. Le différentiel de vitesse étant plus important lors des surfs que des relances, le gain en distance parcourue et en *VMG* ne peut pas être obtenu directement depuis cet indicateur, mais il est forcément supérieur. Par contre, il est intéressant d'observer que l'on retrouve la valeur moyenne de la consigne du mode surf dans la moyenne de l'angle de vent réel. Pour rappel, la consigne est restée inchangée à 150°. L'angle de vent réel moyen est lui égal à 150.66°. Soit la valeur de la consigne de vent réel, plus la moyenne de la consigne du mode surf.

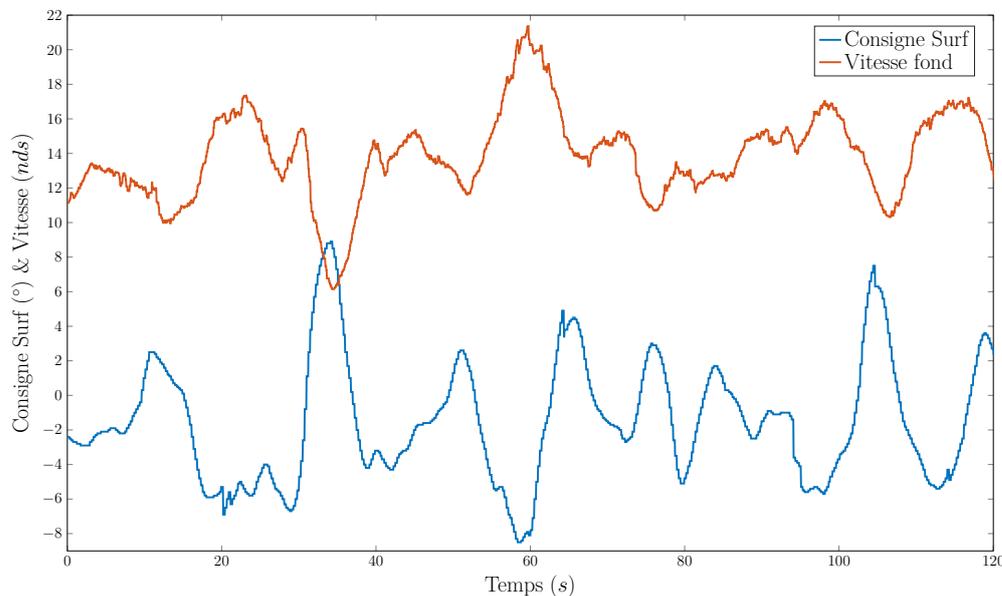


FIGURE 4.2 – Enregistrement de deux minutes, effectué sur le mini N°800 avec le mode surf activé. On remarque une baisse de vitesse à 6*nds* et une pointe de vitesse à 21*nds*. La consigne du Mode Surf est phasée avec ces accélérations.

Nous venons de voir dans ces deux dernières sections, deux nouvelles stratégies de définition de la consigne de pilotage, s'appuyant sur les informations déjà calculées par la centrale de navigation. La section suivante expose les résultats que l'on peut obtenir en

intégrant dans la stratégie du pilote automatique, un nouveau type de capteur qui n'est pas encore disponible sur le marché : le penon électronique.

4.4 ePenons

Cette section présente les résultats obtenus par l'intégration des informations transmises par des penons électroniques dans les algorithmes du pilote automatique.

4.4.1 Introduction

Le terme penon désigne un brin de laine, ou équivalent, qui flotte dans le flux d'air. En observant le comportement de ce penon, on peut en déduire l'orientation du flux ainsi que son agitation. Les penons sont en général collés par paire, de chaque côté de la voile, à proximité de son bord d'attaque (à environ 7-15% de la longueur de corde). Ainsi, en observant l'agitation des penons, on peut savoir si les lignes de courant sont attachées au profil (penon stable et horizontal), ou au contraire, si les lignes de courant du vent incident sont décollées (penon agité et s'écartant du profil).

Alors, en observant conjointement le penon intrados et extrados, on peut estimer α_i , l'angle d'attaque du vent apparent dans la voile. Il est alors possible de l'ajuster, soit en modifiant la tension d'écoute, soit en adaptant la trajectoire du bateau. Ceci dans l'objectif de positionner cet angle dans la zone d'incidence où la composante longitudinale de la résultante des efforts aérodynamiques de la voile est maximale (cf. finesse et Figure (1.3)). La Figure (4.3) résume ce comportement en faisant correspondre sur la courbe de portance de la voile, l'état des penons avec l'angle d'attaque du vent sur le profil.

L'observation du comportement des couples de penons permet alors de régler finement la voile, ou d'ajuster la trajectoire du bateau lorsque l'on navigue au près. Cela en fait l'un des indicateurs le plus observé par le barreur. Malheureusement, cette information n'étant pas retranscrite numériquement, elle n'est pas disponible pour le pilote automatique, ce qui le désavantage par rapport à un barreur humain.

Les premiers travaux sur la version électronique de ces penons ont commencé il y a une dizaine d'années. Ils ont fait l'objet d'un dépôt de brevet par la société MerForte [Voisin *et al.*, 2007]. L'objectif premier de ce développement était d'offrir la possibilité de régler les voiles à l'aide d'un retour sur un écran de contrôle, lorsque les penons classiques ne sont pas visibles. Par exemple la nuit, ou bien sur les maxi-yachts, quand la hauteur du mât et la longueur du pont sont conséquentes. Depuis les premiers prototypes, les problèmes de miniaturisation et de sensibilité ont été résolus par des intégrations validées dans des domaines divers, tels que les éoliennes ou bien les ailes sous-marines. Nous avons donc décidé de tester s'il est

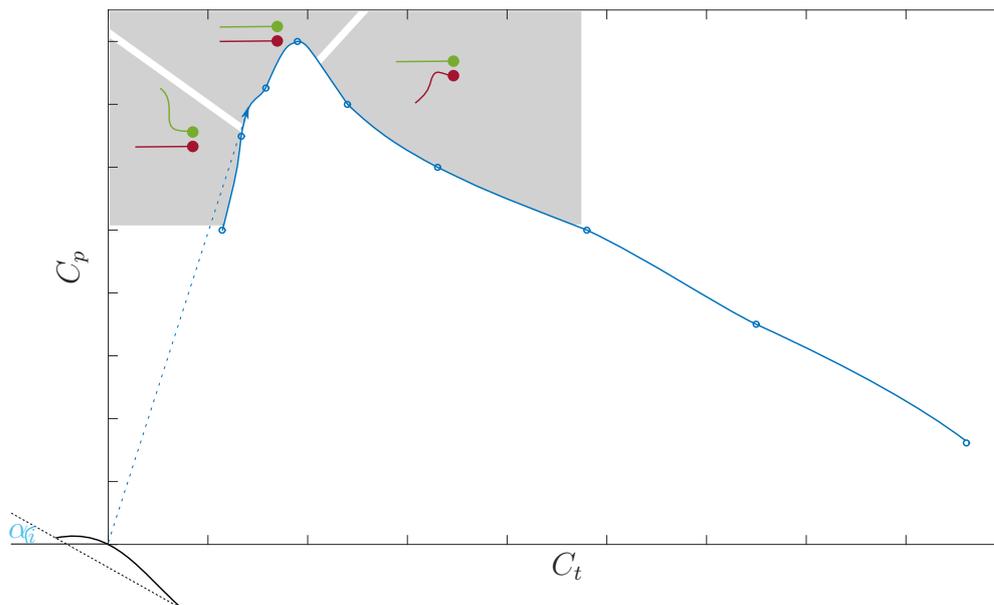


FIGURE 4.3 – État des penons suivant l'angle d'incidence et l'état du flux. Valable pour un bord tribord amure (penon vert côté intrados et rouge côté extrados). Lorsque le penon n'est pas horizontal, cela indique que le flux est décollé de la voile à l'emplacement du penon. L'emplacement des transitions d'état des penons sur la polaire de la voile, dépend du positionnement du penon sur la voile par rapport au bord d'attaque.

possible de récupérer l'information de ces penons pour piloter le bateau. La suite de cette section présente le résultat de ces travaux, réalisés sur un Figaro à l'aide de la plateforme matérielle Processeur HR - Pilote HR et des penons électroniques développés par la société MerForte. Nous allons voir que la validité du concept a été démontrée et que les espérances de performance ont été dépassées.

4.4.2 Intégration au pilotage automatique

Le capteur penon électronique développé par MerForte est composé d'une jauge de contrainte sur laquelle est fixée la partie soumise au flux d'air (une sorte de languette en plastique souple). Alors, quand la languette (le penon), est excitée par le vent, la contrainte sur la jauge est modifiée. C'est cette excitation de la jauge qui permet de qualifier l'état du penon, et donc du flux d'air qui l'excite.

Jusqu'à présent les informations extraites de ce capteur étaient dédiées à l'affichage. On souhaitait récupérer un statut binaire : soit le flux est accroché, soit il est décollé. Cette classification est simple : on choisit un seuil, et lorsque le signal d'excitation de la jauge de contrainte dépasse ce seuil, le penon est déclaré comme étant dans un flux décollé. Sinon, si l'excitation est faible, le flux est considéré comme étant accroché au profil.

Cette technique fonctionne bien et est suffisante pour l'affichage. Cependant, elle nécessite d'une part, une calibration préalable du seuil, et d'autre part, l'information finale est de type binaire. Or, pour faire de l'asservissement, on préfère travailler sur une variable continue. Alors, on travaillera directement sur le résultat de la numérisation de l'excitation de la jauge de contrainte, en l'occurrence une numérisation sur 10 bits. Le fonctionnement actuel du système nous permet de récupérer cette numérisation par transmission radio, une fois par seconde.

Présentons maintenant la stratégie déployée. L'idée principale est de "sauvegarder" l'état, le comportement moyen de l'ensemble des penons disposés sur la voile. Cet état moyen servira ensuite de référence que le pilote automatique devra conserver en ajustant la trajectoire du bateau. Cet état de référence n'est pas spécifié par l'utilisateur mais est enregistré à partir des mesures passées lorsque le mode de pilotage par les penons électroniques est activé. Typiquement, le skipper s'applique à barrer au près avec les voiles réglées dans la configuration choisie. Lorsqu'il appuiera sur "auto", le pilote sauvegardera cet état qu'il devra conserver.

À partir de 2 paires de penons électroniques, soit 4 penons : 2 à tribords et 2 à bâbord, les paires l'une au dessus de l'autre (comme disposé sur la Figure (4.4)), la mise en application du comportement décrit peut être respectée par le principe suivant :

On commence par faire la moyenne glissante sur une période relativement longue, environ 30 secondes, de chacune des valeurs brutes envoyées par les penons à $1Hz$. Puis, on associe les moyennes tribord et bâbord entre elles. On dispose alors de 2 variables : la moyenne tribord et la moyenne bâbord. Ce sont ces moyennes que l'on sauvegarde à la mise sous auto. Elles représentent le contexte de réglage de la voile.

Ensuite, on va observer la différence des valeurs courantes par rapport à ces 2 références :

- Côté intrados :
 - Si l'écart au vent est négatif, les penons intrados sont plus stables que la référence, le bateau est trop abattu.
 - Si l'écart au vent est positif, les penons intrados sont moins stables que la référence, le bateau est trop lofé.
- Côté extrados
 - Si l'écart sous le vent est négatif, les penons extrados sont plus stables que la référence, le bateau est trop lofé.
 - Si l'écart sous le vent est positif, les penons extrados sont moins stables que la référence, le bateau est trop abattu.

Alors, à partir de la différence des écarts intrados et extrados, on peut écrire la règle suivante :

- Si la différence des écarts à la référence est positive, il faut lofer,
- Si la différence des écarts à la référence est négative, il faut abattre.

Un exemple de l'utilisation de cette différence des écarts intrados et extrados à la

référence peut être le suivant :

Après avoir été pondérée par un gain lui même ajustable par l'utilisateur, cette valeur est, à la manière des "Modes Super", additionnée à un mode de pilotage classique, en l'occurrence le mode compas, ceci dans l'objectif de reposer sur une référence stable et réactive aux perturbations causées par exemple par les vagues. Cette consigne de cap est modifiée par la différence des écarts intrados et extrados à la référence, de façon cumulative. On se retrouve alors avec un contrôleur de type intégral.

La Figure (4.4) représente 2 captures d'écran de la vidéo enregistrée lors des tests effectués dans la baie de Port-la-Forêt. On y distingue les 4 penons électroniques avec leur languette verte. Les penons en laine intrados, indiquent que le bateau est trop lofé pour ce réglage de voile. Cette information n'est visuellement pas distinguable sur les penons électroniques, elle l'est cependant sur l'observation du signal numérique. Lors de cette journée de tests, le vent venant de terre était très variable. De l'ordre de $\pm 45^\circ$ et $\pm 10\text{nds}$ sur la direction et vitesse du vent réel. Cependant, le bateau sous pilote automatique accompagnait très correctement ces changements de direction.

4.4.3 Conclusion

La preuve de la faisabilité et de l'intérêt de l'intégration des penons électroniques au pilotage automatique a été démontrée. Toutefois, si le pilotage à l'aide des penons est performant, ils n'ont pas vocation à remplacer la girouette, mais à compléter la prise d'information. Pour par exemple, au portant, ajuster la trajectoire du bateau dans les surfs afin de conserver un angle d'attaque optimal dans les voiles d'avant équipées en penons électroniques. Ces penons peuvent cependant remplacer efficacement le capteur aérien si celui-ci devient hors service, mais uniquement au près (car il n'est pas possible de piloter en mode vent apparent au portant).

La qualité du pilotage peut être encore améliorée, en calibrant en sortie de la chaîne de montage, les penons électroniques. En effet, lorsqu'ils ne sont pas calibrés, les penons ne transmettent pas la même information pour une même excitation. Alors, la réponse du pilote automatique est légèrement dissymétrique d'un bord sur l'autre. Transmettre la valeur moyenne de l'excitation de la jauge de contrainte au cours de la dernière seconde, plutôt qu'une valeur instantanée toutes les secondes, est également une piste d'amélioration. Enfin, une régulation Proportionnelle Intégrale, plutôt qu'uniquement Intégrale, permettrait d'améliorer significativement la réactivité du pilote.



(a) Camera 1



(b) Camera 2

FIGURE 4.4 – Captures écran de la vidéo d'un test sous pilotage automatique. Les captures indiquent qu'à cet instant, les penons extradors ("BAB" pour bâbord) sont laminaires. On remarque que le penon de laine au vent supérieur est orienté vers le haut, et que l'interface indique que le penon électronique associé est turbulent. Cette situation indique que le bateau est légèrement trop lofé. L'algorithme de traitement des informations des penons l'interprète bien puisque le pilote souhaite abattre de 1° ("ConsignePilote=01")

4.5 Conclusion

Nous venons de parcourir dans ce 4^{ème} chapitre les contributions apportées au pilotage automatique. Celles-ci prennent premièrement la forme d'un nouveau concept de "Mode Super", venant en sur-couche des modes de pilotage classiques. Leur rôle est d'améliorer la sécurité du pilotage pour le mode rafale et d'améliorer la performance pour le mode surf. Ces nouveautés ont été validées par des victoires en course, ont reçu un prix de l'innovation et fait l'objet d'un dépôt de brevet pour le mode surf. Le pilote étant maintenant capable de barrer comme un humain dans les surfs.

La dernière contribution apportée au pilote automatique concerne l'intégration d'un nouveau type de capteur : les penons électroniques. La preuve de la faisabilité de l'intégration de ce type de capteur a été démontrée avec succès, puisque les performances sous pilote permettent d'envisager de remplacer l'aérien en cas de casse (pour les allures de près uniquement), ou bien d'intégrer l'information venant de ces penons en supplément des modes classiques, afin d'améliorer la performance du bateau.

Cette thèse s'inscrit dans la démarche de l'entreprise nke visant à améliorer la qualité des informations calculées par ses centrales de navigation, ainsi que dans l'effort constant fourni pour améliorer la performance de son pilote automatique. L'objectif premier de cette thèse était donc de lever les verrous scientifiques dégradant la qualité de la mesure du vent apparent et du vent réel, effectuée depuis un voilier en mouvement. Les travaux connexes réalisés sur le pilote automatique, permettent de répondre au souhait de l'entreprise de proposer aux utilisateurs des algorithmes de pilotage novateurs et plus performants que l'offre actuelle.

Nous avons vu dans le premier chapitre le contexte spécifique à la mesure du vent depuis un voilier, en exposant le fonctionnement général d'un bateau à voile. Cela nous a permis de comprendre les différents concepts de vent, et de mettre en évidence les problématiques associées à la mesure et celles liées à la conceptualisation et reconstruction du vent réel en 3 dimensions. Ce premier chapitre a permis de mettre en évidence la forte corrélation entre les différentes équations, qui engendre une propagation amplifiée des erreurs, ce qui interpelle sur la nécessité d'apporter le plus grand soin à la source de l'information. Le travail effectué sur cette source d'information a été détaillé dans le second chapitre, qui a premièrement exposé le fonctionnement de toutes les technologies permettant de mesurer le vent. Ce travail s'est conclu sur la décision de continuer à utiliser un capteur anémométrique "traditionnel". Ce choix a été motivé d'une part par la robustesse éprouvée de ce type de capteur et d'autre part par la maîtrise de son coût de fabrication. Tout cela en émettant l'hypothèse que son déficit de performance, dû à ses parties mobiles, peut être corrigé par un travail d'optimisation et de traitement du signal. Ces travaux d'amélioration sont l'objet de la suite du deuxième chapitre et ont contribué à l'amélioration de la performance globale de la mesure du vent apparent, grâce à deux approches complémentaires, détaillées ci-dessous :

La première étape d'optimisation s'est concentrée sur la recherche de la forme optimale des senseurs, qui était jusqu'à présent effectuée de manière empirique. Cette optimisation, obtenue à l'aide d'outils de recherche opérationnelle, a non seulement permis de diviser le temps de réponse de la girouette par 2, mais aussi de définir la forme optimale pour chaque bateau et pour chaque programme de navigation par la création d'un outil spécifique. Cette étape d'optimisation du design a nécessité au préalable le développement et la validation

d'un modèle mathématique, décrivant le comportement dynamique des parties mobiles des capteurs. Ces équations mathématiques ont ensuite pu être réutilisées lors de l'étape de traitement du signal. La dernière section du second chapitre est consacrée à l'amélioration de la réactivité et de la précision des informations fournies par l'aérien, en travaillant sur le signal numérisé. Ces travaux de traitement du signal se sont appuyés sur le filtre prédictif de Kalman. Ce filtre permet d'intégrer les équations décrivant la dynamique des capteurs précédemment développées. Grâce à sa capacité de prédiction, il apporte une amélioration très significative du signal utile. Le temps de réponse de la girouette a ainsi été divisé par 6, et celui de l'anémomètre par 5. Alors, en associant les gains apportés par le nouveau design de la pale et celui du traitement du signal, le temps de réponse du signal utile de la girouette est ainsi 12 fois plus faible qu'au début de cette étude.

Le troisième chapitre a détaillé nos travaux liés aux problématiques de reconstruction du vent réel, tout d'abord en s'intéressant aux normes et définitions des métriques qui lui sont associées. La seconde section du troisième chapitre nous a permis d'apporter des solutions, afin de prendre en compte les perturbations qui s'appliquent au vent réel et que l'on doit considérer lorsque l'on cherche à qualifier la performance du bateau, mais aussi lorsque l'on reconstruit le vent réel à partir des mesures effectuées par les capteurs embarqués sur le bateau. Enfin, la dernière section du troisième chapitre s'est concentrée sur la méthode de reconstruction du vent réel. Nous y avons premièrement vu que les méthodes actuelles ne sont pas satisfaisantes, notamment parce que les corrections ne sont pas appliquées dans les bons référentiels. Puis, ce chapitre s'est clôturé par notre nouvelle proposition de reconstruction du vent réel, qui prend en compte les méthodes de corrections précédemment décrites dans le manuscrit.

Enfin, le quatrième chapitre de ce manuscrit expose nos contributions apportées au pilotage automatique. Celles-ci prennent premièrement la forme d'un nouveau concept de "Mode Super", venant en sur-couche des modes de pilotage classiques. Leur rôle est d'améliorer la sécurité du pilotage pour le mode rafale et d'améliorer la performance pour le mode surf. Ces nouveautés ont été validées par des victoires en course, ont reçu un prix de l'innovation et fait l'objet d'un dépôt de brevet pour le mode surf. Le pilote étant maintenant capable de barrer comme un humain dans les surfs. La dernière contribution apportée au pilote automatique concerne l'intégration d'un nouveau type de capteur : les penons électroniques. La preuve de la faisabilité de l'intégration de ce type de capteur a été démontrée avec succès, puisque les performances sous pilote permettent d'envisager de remplacer l'aérien en cas de casse, ou bien d'intégrer l'information venant de ces penons en supplément des modes classiques, afin d'améliorer la performance du bateau.

Les travaux réalisés satisfont l'objectif initial, car non seulement les améliorations apportées à la mesure du vent apparent et réel permettent d'améliorer la qualité des données utiles de la centrale de navigation, mais aussi d'améliorer la performance du pilote automatique qui profite de cette meilleur qualité de vent. Les travaux connexes sur les algorithmes de

pilotage, permettent quant à eux à nke de proposer à ses clients le pilote automatique aujourd'hui le plus performant et novateur. Les contributions sur la reconstruction du vent réel ne sont cependant pas implémentées sur la plateforme aujourd'hui commercialisée à cause d'un manque de ressources matérielles et de problèmes d'architecture. Cette intégration est prévue dans le nouveau matériel en développement. La nouvelle approche du débruitage du vent apparent a débouché sur la mise sur le marché d'un nouveau produit : l'interface pied de mât. Ce dispositif permet de débruiter le vent et est vendu 10 fois moins cher que le matériel précédemment nécessaire. Enfin, le manuscrit contribue à l'appréhension de la globalité des problématiques et subtilités qui interviennent, lorsque l'on travaille sur une centrale de navigation et un pilote automatique.

Ces travaux peuvent trouver une continuité dans la recherche de précision de la mesure du vent apparent, en observant l'effet de la variation de la densité de l'air sur la vitesse de rotation de l'anémomètre. On considérait jusqu'à présent que ces variations n'avaient aucune incidence, mais une étude récente tend à montrer que ce n'est peut-être pas le cas [Pindado *et al.*, 2012]. Enfin, nous avons exposé la forte corrélation entre les différents capteurs et données calculées par la centrale de navigation. Une avancée significative sur la précision de l'ensemble pourra être obtenue lorsque le concept du filtre de Kalman sera étendu et appliqué à la centrale de navigation dans sa globalité.

A

Angle Effectif

A.0.1 Matrices de rotation

$$R_\alpha = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.1})$$

$$R_\theta = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad (\text{A.2})$$

$$R_\phi = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{pmatrix} \quad (\text{A.3})$$

$$R_T = \begin{pmatrix} \cos(\theta) \cos(\alpha) & \cos(\alpha) \sin(\theta) \sin(\phi) - \cos(\phi) \sin(\alpha) & \sin(\phi) \sin(\alpha) + \cos(\phi) \cos(\alpha) \sin(\theta) \\ \cos(\theta) \sin(\alpha) & \cos(\phi) \cos(\alpha) + \sin(\theta) \sin(\phi) \sin(\alpha) & \cos(\phi) \sin(\theta) \sin(\alpha) - \cos(\alpha) \sin(\phi) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \sin(\phi) & \cos(\theta) \cos(\phi) \end{pmatrix} \quad (\text{A.4})$$

La matrice de rotation totale $R_T = R_\alpha R_\theta R_\phi$ (A.4) permet de passer à de la référence à l'aide des matrices intermédiaires (A.1),(A.2),(A.3).

A.0.2 Recherche de l'angle effectif β_{eff}

L'angle effectif β_{eff} correspond à l'angle d'attaque du vent subit par le plan de voilure. Si il est défini au même endroit qu'une prise de mesure par un instrument, si la chaîne de mesure est bonne, la valeur mesurée β_{mes} doit correspondre à β_{eff} .

Il faut distinguer deux approches dans la problématique du vent effectif. En effet, il y a les physiciens qui rentrent dans leurs modèles numériques un angle de vent apparent β_{app} , ou bien un angle de vent réel $\beta_{T_{Ground}}$ et qui cherchent à retrouver le β_{eff} correspondant.

L'autre problématique est celle en situation réelle : Mesure d'un vent β_{mes} et l'on cherche à obtenir β_{app} et $\beta_{T_{Surf}}$.

A.0.2.1 Bateau à plat

Quand le bateau est strictement à l'horizontal le problème ne se pose pas puisque les repères R_{BDyn} et R_{BFlat} sont confondus. \vec{V}_{eff} et \vec{V}_{app} sont alors identiques, on obtient alors : $\beta_{eff} = \beta_{mes} = \beta_{app}$.

Le vecteur de vent apparent \vec{V}_{app} est défini par :

$$\vec{V}_{app} = \begin{pmatrix} -\cos(\beta_{mes}) \\ -\sin(\beta_{mes}) \\ 0 \end{pmatrix} V_{mes} \quad (\text{A.5})$$

A.0.2.2 Gîte et Tangage

On cherche le vecteur vent apparent effectif \vec{V}_{eff} dans le repère R_{BDyn} d'après \vec{V}_{app} .

$$\vec{V}_{eff} = P_{BFlat}^{BDyn} \vec{V}_{app} \quad (\text{A.6})$$

La matrice de passage P_{BFlat}^{BDyn} est construite à partir des matrices de rotation A.2 et A.3.

$$P_{BFlat}^{BDyn} = (R_\theta \times R_\phi)^{-1} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) \sin(\phi) & \cos(\phi) & \cos(\theta) \sin(\phi) \\ \cos(\phi) \sin(\theta) & -\sin(\phi) & \cos(\theta) \cos(\phi) \end{pmatrix} \quad (\text{A.7})$$

A.6 devient A.8 d'après A.7 et A.5 :

$$\vec{V}_{eff} = \begin{pmatrix} -\cos(\beta_{app}) \cos(\theta) \\ -\sin(\beta_{app}) \cos(\phi) - \cos(\beta_{app}) \sin(\theta) \sin(\phi) \\ \sin(\beta_{app}) \sin(\phi) - \cos(\beta_{app}) \cos(\phi) \sin(\theta) \end{pmatrix} \vec{V}_{app} \quad (\text{A.8})$$

L'angle de vent effectif β_{eff} s'obtient alors d'après V_{effx} et V_{effy} :

$$\tan(\beta_{eff}) = \frac{V_{effy}}{V_{effx}} = \frac{\sin(\beta_{app}) \cos(\phi) + \cos(\beta_{app}) \sin(\theta) \sin(\phi)}{\cos(\beta_{app}) \cos(\theta)} \quad (\text{A.9})$$

A.9 se simplifie en :

$$\beta_{eff} = \arctan \left(\tan(\theta) \sin(\phi) + \frac{\tan(\beta_{app}) \cos(\phi)}{\cos(\theta)} \right) \quad (\text{A.10})$$

A.9 nous permet de déduire β_{app} à partir de β_{eff} :

$$\beta_{app} = \arctan \left(\frac{\cos(\theta) (\tan(\beta_{eff}) - \tan(\theta) \sin(\phi))}{\cos(\phi)} \right) \quad (\text{A.11})$$

A.0.3 Recherche de l'angle d'attaque vertical ψ

A.0.3.1 Gîte et Tangage

Vitesse du vent dans le plan effectif, comme pour A.9, V_{eff} s'obtient d'après :

$$V_{eff} = \sqrt{V_{effx}^2 + V_{effy}^2} \quad (\text{A.12})$$

$$V_{eff} = \sqrt{(V_{app} \sin(\beta_{app}) \cos(\phi) + V_{app} \cos(\beta_{app}) \sin(\theta) \sin(\phi))^2 + V_{app}^2 \cos(\beta_{app})^2 \cos(\theta)^2} \quad (\text{A.13})$$

ψ , l'angle d'attaque vertical de V_{eff} avec le plan défini par les vecteurs V_{effx} et V_{effy} .

$$\arctan \psi = \frac{V_{effz}}{-V_{eff}} \quad (\text{A.14})$$

A.14 devient :

$$\psi = \arctan \left(-\frac{\sin(\beta_{app}) \sin(\phi) - \cos(\beta_{app}) \cos(\phi) \sin(\theta)}{\sqrt{(\sin(\beta_{app}) \cos(\phi) + \cos(\beta_{app}) \sin(\theta) \sin(\phi))^2 + \cos(\beta_{app})^2 \cos(\theta)^2}} \right) \quad (\text{A.15})$$

D'après A.13 on obtient V_{app} :

$$\frac{\sqrt{(\sin(\beta_a) \cos(\phi) + \cos(\beta_a) \sin(\theta) \sin(\phi))^2 + \cos(\beta_a)^2 \cos(\theta)^2}}{\sqrt{\cos(\beta_a)^2 \cos(\theta)^2 + \cos(\beta_a)^2 \sin(\theta)^2 \sin(\phi)^2 + 2 \cos(\beta_a) \sin(\beta_a) \cos(\phi) \sin(\theta) \sin(\phi) + \sin(\beta_a)^2 \cos(\phi)^2}} \quad (\text{A.16})$$

ou Alors :

$$V_{app} = \frac{V_{eff}}{\cos \psi} \quad (\text{A.17})$$

A.0.3.2 Gîte seule

A.11 se simplifie en :

$$\beta_{app} = \arctan\left(\frac{\tan(\beta_{eff})}{\cos(\phi)}\right) \quad (\text{A.18})$$

et A.16 se simplifie en :

$$V_{app} = \frac{V_{eff}}{\sqrt{1 - \sin(\beta_{app})^2 \sin(\phi)^2}} \quad (\text{A.19})$$

et A.15 en :

$$\psi = -\arctan\left(\frac{\sin(\beta_{app}) \sin(\phi)}{\sqrt{1 - \sin(\beta_{app})^2 \sin(\phi)^2}}\right) \quad (\text{A.20})$$

Annexe **B** Moulinets

Pour évaluer l'influence de la forme des godets sur la performance de l'anémomètre, 3 moulinets ont été imprimés avec un rotor et des bras identiques. Seuls les godets sont différents. La Figure (B.1) reprend les modèles 3D des moulinets testés en soufflerie. Le choix de la forme des godets respecte la logique suivante :

- le moulinet "demi-sphère tronquée", correspond au moulinet actuellement en production chez nke. Le godet est en forme de demi-sphère tronquée à 35%,
- le moulinet "cône", correspond à la forme possédant l'intégration du coefficient de portance sur un tour le plus élevé : $\int_0^{2\pi} C_N(\alpha_i) d\alpha_i$ (cf. Figure(2.10)).
- le moulinet "demi-sphère", correspond à la forme des godets la plus courante dans le milieu du nautisme.

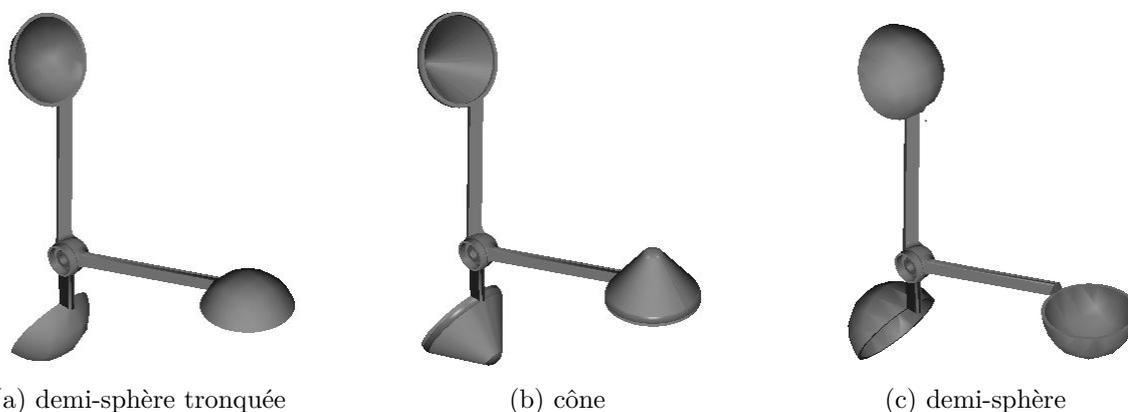


FIGURE B.1 – Modèles 3D des moulinets imprimés pour les tests en soufflerie.

Les tests en soufflerie ont démontré que contrairement aux résultats attendus, le moulinet possédant la meilleure constante de temps est le "demi-sphère tronquée". Puis ensuite le "demi-sphère", avec un temps de montée supérieur de 30%. Et enfin le moulinet "cône", avec un temps de montée 53% plus élevée que le "demi-sphère tronquée".

C

Modélisation de la mer et de la réponse en tangage

C.1 Introduction

Les travaux exposés dans cette section ont été réalisés dans l'objectif d'obtenir des estimations des vitesses de déplacement de la tête de mât, causées par les vagues. Ceci dans le but de produire des simulations de ces mouvements, à partir de l'information de la taille du bateau, de la force du vent réel et de l'allure du voilier. La réalisation de cet objectif nécessite premièrement de s'intéresser à la modélisation de l'état de la mer.

C.2 Modèle de mer

L'état de la mer est communément représenté sous la forme d'un spectre d'énergie $S_v(\omega)$. Nous avons choisi d'utiliser la représentation de Pierson-Moskowitz, qui est un cas particulier du spectre de Bretschneider. Ce spectre peut être spécifié à partir de l'unique information de vitesse de vent réel [Fossen, 2011]. La Figure (C.1) représente la forme de ces spectres pour différents états de mer (se référer à la Table (3.7) pour les forces de vent correspondantes). On peut alors simuler un signal représentant les vagues à partir de l'un de ces spectres.

Cependant, cette simulation des vagues n'a de sens que si l'on est capable de connaître la réponse du bateau à cette excitation. Celle-ci est caractérisée par la RAO.

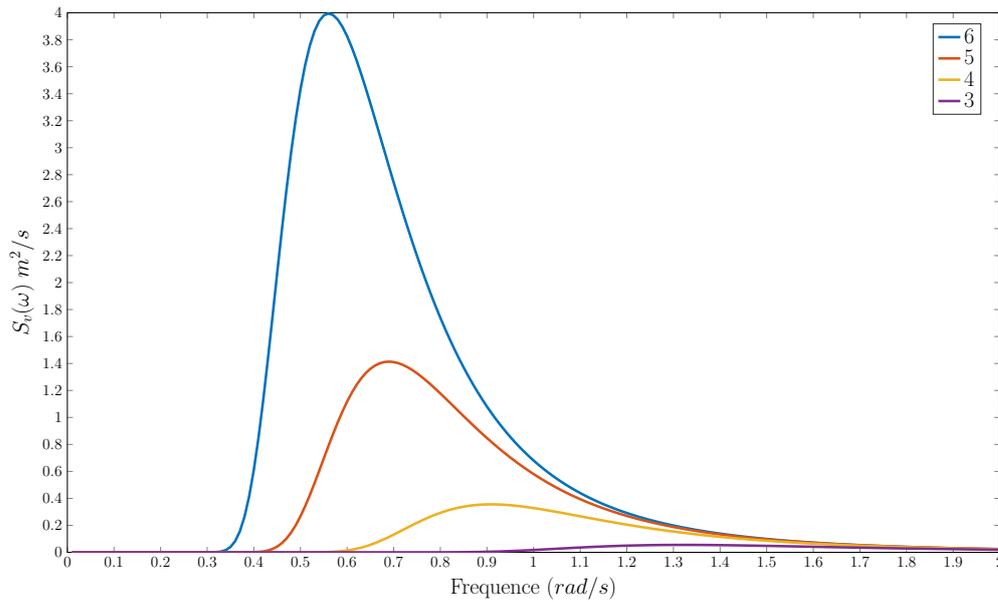


FIGURE C.1 – Spectre d'énergie de l'état de la mer pour différentes codifications de l'état de mer (cf. Tableau (3.7)) suivant la représentation de Pierson-Moskowitz.

C.3 Modèle de RAO

La réponse d'un bateau à une excitation d'un train de vague, est définie par sa fonction de transfert suivant l'axe du navire considéré, en anglais RAO pour Response Amplitude Operator. Pour notre application, on ne s'intéressera qu'à la réponse en tangage, celle pour laquelle les mouvements sont les plus violents. Cette fonction de transfert est généralement construite à partir des logiciels utilisés par les architectes. Cependant, on préférera la méthode décrite par [Combourieu *et al.*, 2013], qui permet d'obtenir une approximation réaliste de la RAO pour les bateaux de type quillards, et ce, uniquement à partir de l'information de la longueur à la flottaison.

C.3.1 Fréquence réduite

Du fait que le bateau possède une vitesse de déplacement non nulle, il ne subit pas les vagues à la même fréquence que celles-ci. La fréquence de rencontre nommée fréquence réduite ω_e , sera plus élevée si le bateau navigue contre les vagues ou inversement plus faible si il les accompagne. Elle est estimée à l'aide de l'équation (C.1) [Perez, 2005], en postulant que le train de vague est orienté dans la même direction que le vent réel. Ce décalage en fréquence est visible sur la Figure (C.2).

$$\omega_e = \frac{V_{Bs} \cos \beta_T}{g} \omega^2 + \omega \quad (\text{C.1})$$

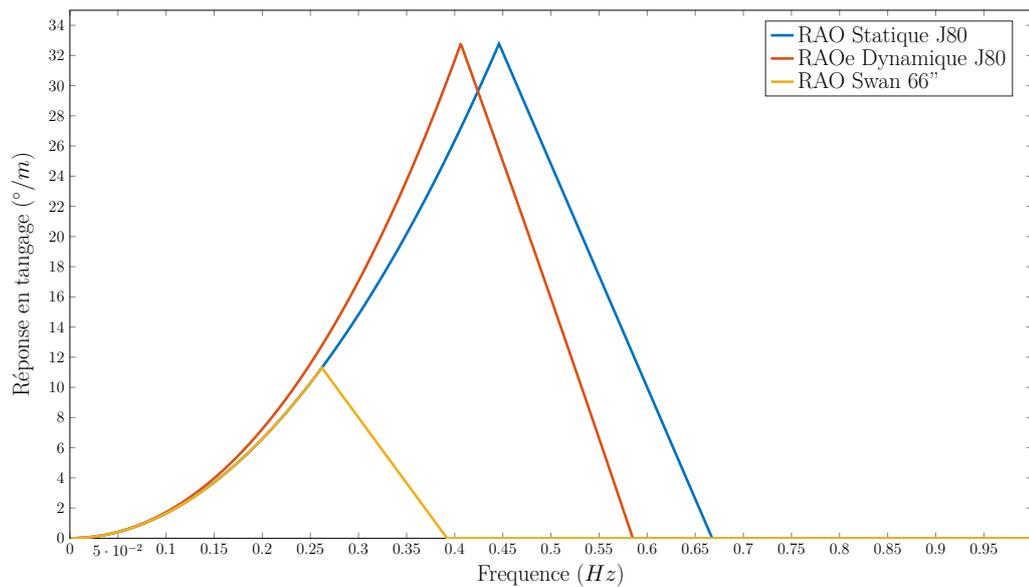


FIGURE C.2 – Comparaison des RAO en fonction de la fréquence des vagues dans le cas d’un petit bateau de 8m, le J80 et un gros bateau de 20m, le Swann. Ces deux bateaux possèdent le même profil de réponse pour les basses fréquences (la grosse houle), mais plus la fréquence augmente, plus la période des vagues diminue et plus la taille du bateau permet d’atténuer les mouvements. La courbe "Dynamique" correspond à la réponse du J80 lorsqu’il avance au près à 6*nds*. Alors, son RAO est défini non pas en fonction de la période des vagues mais en fonction de la fréquence réduite. Comme il se "rapproche" des vagues, sa fonction de transfert équivalente est décalée vers les basses fréquences.

C.4 Simulation

Pour obtenir la réponse en tangage du navire en fonction de l’état de la mer, que l’on caractérise par son spectre d’énergie en fréquence S_v , il suffit de faire le produit du spectre des vagues par la fonction de transfert, corrigée de la fréquence réduite, au carré :

$$S_t(\omega) = S_v(\omega) \times RAO_e^2(\omega) \quad (\text{C.2})$$

Un exemple appliqué à un J80 au près dans 15*nds*, est exposé sur la Figure (C.3). Il est ensuite possible de reconstituer une simulation des angles et des vitesses de tangage du bateau.

La Figure (C.4) reprend le spectre de puissance de tangage $S_t(\omega)$ de la Figure (C.3) et donne un exemple de ce que pourrait-être un signal ayant un spectre de puissance équivalent. On peut alors utiliser ce signal pour nourrir les simulations de reconstruction du vent réel et ainsi ajouter du bruit de mouvement réaliste.

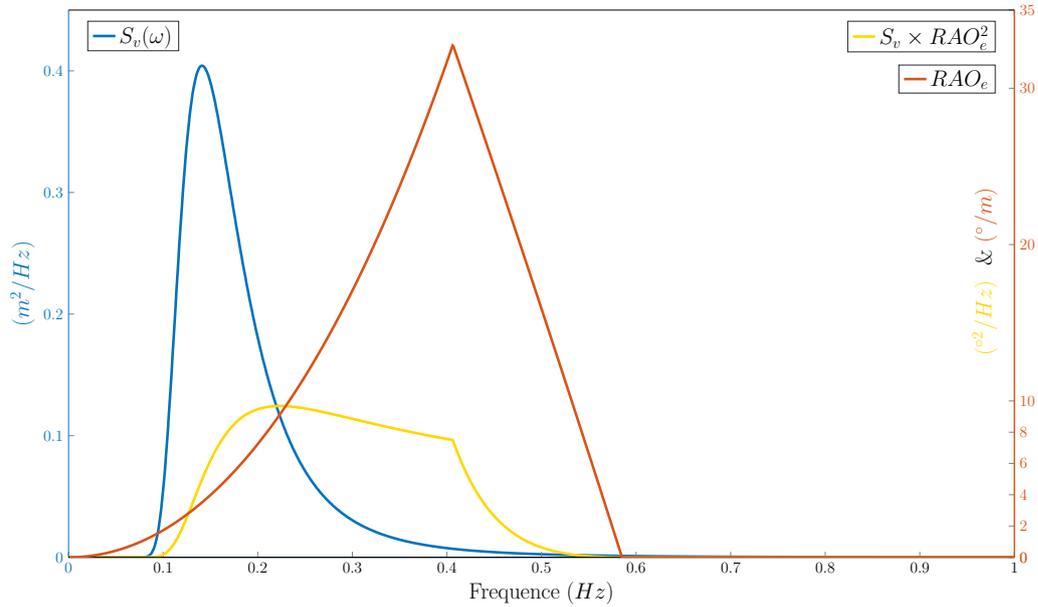


FIGURE C.3 – Construction du spectre de puissance de tangage $S_t(\omega)$ à partir du spectre de puissance de l'état de mer $S_v(\omega)$ valable pour une force de vent de 15nds, et de la réponse en tangage d'un J80 corrigée de la fréquence réduite d'une navigation au près.

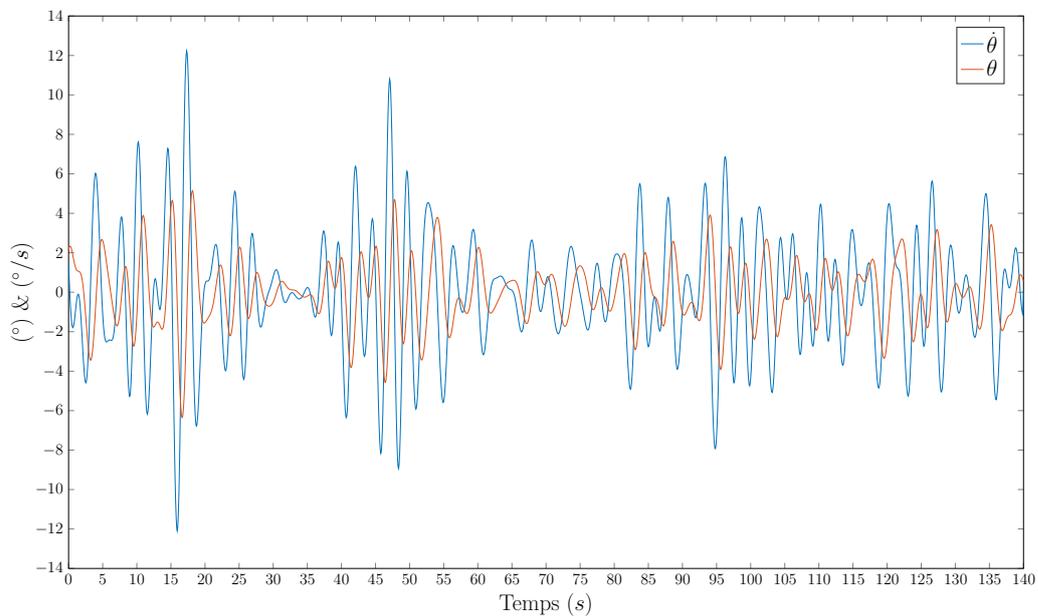


FIGURE C.4 – Exemple de simulation de tangage pour un J80 au près dans 15nds de vent réel. Le spectre de puissance $S_t(\omega)$ utilisé pour cette simulation est celui de la Figure (C.3).

D Interface Pied de Mât

Dans la gamme actuelle nke, pour débruiter le vent des mouvements du bateau, il faut s'équiper des capteurs haut de gamme. À savoir le compas-centrale inertielle et le processeur HR. Dans l'objectif de proposer une solution moins onéreuse, et comme nous avons revu la procédure de reconstruction du vent réel, il nous est maintenant possible de proposer un produit dédié au débruitage. C'est dans cet objectif que nous avons développé l'interface pied de mât. Comme son nom l'indique, elle se positionne en pied de mât, proche du centre de rotation du bateau. Elle s'insère dans le schéma de montage, entre le capteur et le reste de l'installation. Alors, l'interface va soustraire aux informations fournies par l'aérien, les mouvements du bateau : exactement ce qui est décrit dans l'étape 4 de la Figure (3.9). Comme on ne souhaite soustraire que les vitesses de giration du bateau, on peut se contenter d'utiliser des capteurs gyroscopiques. On utilise alors un capteur 6 axes de premier prix. Les gyroscopes comportent un offset, dont on arrive facilement à faire abstraction en s'aidant des 3 accéléromètres à disposition. Ce produit permet de s'insérer dans une installation courante. L'utilisateur pourra tirer partie de ce débruitage pour gagner en confort d'affichage (les informations de vitesses et de direction du vent étant beaucoup plus stables, car elles ne varient plus avec les mouvements de roulis et de tangage). Ce vent débruité est également profitable au pilote automatique, car le vent nécessite moins de filtrage. Le pilote gagne donc en réactivité.

Cette interface permet également de connecter plusieurs aériens pour, d'une part, mettre en place une stratégie de sauvegarde quand l'un d'entre-eux est déclaré en panne, et d'autre part, pour sélectionner l'aérien le mieux situé en tête de mât. Par exemple, lorsque l'un est orienté vers l'arrière du bateau, alors, l'interface le sélectionnera aux allures portantes afin de minimiser les effets d'upwash.



FIGURE D.1 – Photo de l'interface pied de mât, de nom commercial "Apparent Wind Monitor".

Bibliographie

- [Ackermann, 1983] ACKERMANN, G. R. (1983). Means and Standard Deviations of Horizontal Wind Components.
- [Adrena, 2016] ADRENA (2016). Adrena.fr.
- [Ainsworth, 2000] AINSWORTH, T. (2000). "Significant Wave Height " A closer look at wave forecasts. Rapport technique, NOAA NWS, Juneau.
- [Akra, 2016] AKRA, H. (2016). Développement d'une IHM pour un outil de conception de la pâle d'un anémo-girouette. Rapport technique, UBS, Lorient.
- [Al., 1999] AL. (1999). Wind Speed Measurement and Use of Cup Anemometry. Rapport technique, International Energy Agency.
- [Barbeau, 1988] BARBEAU, C. (1988). Système de mesures combinées de vitesse et de direction du vent et autre fluide.
- [Barrett et Suomi, 1949] BARRETT, E. W. et SUOMI, V. E. (1949). Preliminary report on temperature measurement by sonic means. *Journal of Meteorology*, 6 :273–276.
- [Beard et McLain, 2012] BEARD, R. et MCLAIN, T. (2012). *Small Unmanned Aircraft : Theory and Practice*. Princeton University Press.
- [Bernot, 2004] BERNOT, J.-Y. (2004). *Météo et Stratégie : Croisière et course au large*. Gallimard, ffv édition.
- [Bernot, 2007] BERNOT, J.-Y. (2007). *Météo locale : Croisière et régates*. Gallimard, ffv édition.
- [Bernot, 2015] BERNOT, J.-Y. (2015). *Les routages, en course et en croisière*. Voiles Et Voiliers, ffv édition.
- [Bethwaite, 2010] BETHWAITE, F. (2010). *High Performance Sailing : Faster Racing Techniques*. Adlard Coles Nautical, London, 2nd édition.
- [Boehm et al., 2013] BOEHM, C., BREHM, R., MEYER, J., DUGGEN, L. et GRAF, K. (2013). A Measurement System for Performance Monitoring on Small Sailing Dinghies. In *THE 21th CHESAPEAKE SAILING YACHT SYMPOSIUM*, ANNAPOLIS,.
- [Bowditch, 2002] BOWDITCH, N. (2002). The American Practical Navigator. *Deffense Mapping Agency Hydrographic/Topographic*, 9 :882.

- [Bravo, 1999] BRAVO (1999). Sailsys V3 Reference Manual. Rapport technique, Bravo.
- [Brevoort et Joyner, 1934] BREVOORT, M. et JOYNER, U. (1934). Aerodynamic characteristics of anemometer cups. Rapport technique February, National Advisory Committee for Aeronautics, Washington.
- [Brevoort et Joyner, 1935] BREVOORT, M. et JOYNER, U. (1935). Experimental investigation of the Robinson-type cup anemometer. Rapport technique, National Advisory Committee for Aeronautics, Langley.
- [Bruce Turner, 1986] BRUCE TURNER, D. (1986). Comparison of Three Methods for Calculating the Standard Deviation of the Wind Direction.
- [Busch et Kristensen, 1976] BUSCH, N. E. et KRISTENSEN, L. (1976). Cup Anemometer Overspeeding.
- [Cabrera-Gómez *et al.*, 2016] CABRERA-GÁMEZ, J., DOMÍNGUEZ-BRITO, A. C., HERNÁNDEZ-SOSA, J. D., VALLE-FERNÁNDEZ, B., Ramos-de MIGUEL, A. et GARCÍA, J. C. (2016). A Virtual Wind Sensor Based on a Particle Filter. *In Robotic Sailing 2016*, pages 69–78. Springer International Publishing.
- [Casadio *et al.*, 1996] CASADIO, S., DI SARRA, A., FIOCCO, G., FUÀ, D., LENA, F. et RAO, M. P. (1996). Convective characteristics of the nocturnal urban boundary layer as observed with Doppler sodar and Raman lidar. *Boundary-Layer Meteorology*, 79(4) :375–391.
- [Cenedese *et al.*, 1997] CENEDESE, A., COSEMANS, G., ERBRINK, H. et STUBI, R. (1997). Vertical profiles of wind, temperature and turbulence. *Report*, pages 1–46.
- [Cerqueus *et al.*, 2016] CERQUEUS, A., SEVAUX, M., KERHASCOËT, H. et LAURENT, J. (2016). Modélisation de la girouette d’un voilier : expérimentation avec LocalSolver. *In ROADEF : Recherche Opérationnelle et d’Aide à la Décision*, Compiègne.
- [Charnock, 1958] CHARNOCK, H. (1958). A note on empirical wind-wave formulae. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 84(362) :443–447.
- [Cliff, 1975] CLIFF, W. (1975). Laser and Acoustic Doppler Techniques for the Measurement of Fluid Velocities. Rapport technique, NASA.
- [Combourieu *et al.*, 2013] COMBOURIEU, A., FALOCI, F., BOOTE, D. et PAIS, T. (2013). A SIMPLIFIED METHOD TO ASSESS ACCELERATION LOADS ON SAILING YACHT MASTS. *In International Conference on Innovation in High Performance Sailing Yachts Conference*, Lorient.
- [Coneau, 2015] CONEAU, R. (2015). Modélisation du comportement dynamique d’un anémomètre girouette. Rapport technique, Institut de Recherche de l’Ecole Navale de Brest.
- [Congeduti *et al.*, 1981] CONGEDUTI, F., FIOCCO, G., ADRIANI, A. et GUARRELLA, C. (1981). Vertical wind velocity measurements by a Doppler lidar and comparisons with a Doppler sodar. *Applied Optics*, 20(12) :2048.

- [Cook, 1985] COOK, N. (1985). *The designer's guide to wind loading of building structures, Part 1*. Butterworths, London.
- [Coppin, 1982] COPPIN, P. A. (1982). An examination of cup anemometer overspeeding. *Meteorol. Rdsch*, 35 :1–11.
- [CSTB, 1997] CSTB (1997). *Traité de physique du bâtiment, tome 1 : Connaissances de base*. CSTB.
- [Dean et Dalrymple, 1991] DEAN, R. et DALRYMPLE, R. (1991). *Water Wave Mechanics for Engineers & Scientists*. World Scientific Publishing Company.
- [Deparday, 2016] DEPARDAY, J. (2016). *Experimental studies of Fluid-Structure Interaction on Downwind Sails*. Thèse de doctorat, UBO.
- [Desjardins et al., 1986] DESJARDINS, R. L., REID, W. S., BUCKLEY, D. J. et FAGAN, W. (1986). Description and performance testing of a low friction, twin-propeller anemometer with wind vane. *Journal of Physics E : Scientific Instruments*, 19(8) :632–637.
- [Douguet, 2014] DOUGUET, R. (2014). *Optimisation de la mesure et de l'interprétation des performances dans le cadre de la course au large*. Thèse de doctorat, Université de Bretagne Sud.
- [Douguet et Diguët, 2013] DOUGUET, R. et DIGUËT, J. (2013). A New Real-Time Method for Sailboat Performance estimation based on Leeway Modeling. *Chesapeake Sailing Yacht Symposium*.
- [Downs, 1972] DOWNS, T. D. (1972). Orientation statistics. *Biometrika*, 59(3) :665–676.
- [Drela, 2014] DRELA, M. (2014). *Flight Vehicle Aerodynamics*. The MIT Press, London.
- [Dulieu et al., 1999] DULIEU, A., DULIEU, B. et MOLINÉ, C. (1999). Ecarts de pressions au près sur un voilier. Une approche numérique et des mesures à la mer. *In 7ème Journées de L'hydrodynamique*, Marseille.
- [Ebert et Wood, 1995] EBERT, P. et WOOD, D. (1995). On the dynamics of tail fins and wind vanes. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 56(2-3) :137–158.
- [Ecklund et al., 1988] ECKLUND, W. L., CARTER, D. A. et BALSLEY, B. B. (1988). A UHF wind profiler for the boundary layer : brief description and initial results. *J. Atmos. & Oceanic Technol.*, 5 :432–441.
- [Farell, 2008] FARELL, J. (2008). *Aided Navigation, GPS with High Rate Sensors*. The McGraw-Hill Companies.
- [Fetet et Tomao, 2014] FETET, A. et TOMAO, A. (2014). Étude d'un gréement de J80, calcul de vent réel, phénomène d'Upwash. Rapport technique, IRENav.
- [Finch, 2009] FINCH, T. (2009). Incremental calculation of weighted mean and variance. *University of Cambridge*, 1(February) :1–8.
- [Finkelstein, 1981] FINKELSTEIN, P. (1981). Measuring the dynamic performance of wind vanes. *Journal of Applied Meteorology*.

- [Flay, 1996] FLAY, R. G. (1996). A twisted flow wind tunnel for testig yacht sails. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 63(63) :171–182.
- [Flay *et al.*, 1982] FLAY, R. G. J., STEVENSON, D. C. et LINDLEY, D. (1982). Wind structure in a rural atmospheric boundary layer near the ground. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 10(1) :63–78.
- [Flightl et Mcvebil, 1970] FLIGHTL, G. et MCVEBIL, G. E. (1970). Longitudinal and lateral spectra of turbulence in the atmospheric boundary layer. Rapport technique, NSA, Washington.
- [Fossati, 2009] FOSSATI, F. (2009). *Aero-Hydrodynamics and the Performance of Sailing Yachts : The Science Behind Sailing Yachts and Their Design*. Adlard Coles Nautical, London.
- [Fossen, 2011] FOSSEN, T. I. (2011). *Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. Wiley.
- [Foye, 2001] FOYE, A. (2001). *Calcul de la reponse dynamique des structures elancees a la turbulence du vent*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes.
- [GAD-EL-HAK et BLACKWELDER, 1985] GAD-EL-HAK, M. et BLACKWELDER, R. F. (1985). The discrete vortices from a delta wing. *AIAA Journal*, 23(6) :961–962.
- [Garratt, 1992] GARRATT, J. R. (1992). *The atmospheric boundary layer*. Cambridge university press.
- [Garrett, 1897] GARRETT, R. (1897). *The Symetry of Sailing*. Adlard Coles Nautical, 1996 édition.
- [Garrett, 1987] GARRETT, R. (1987). *The symmetry of sailing : the physics of sailing for yachtsmen*. Sheridan House, Dobbs Ferry, NY.
- [Gatehouse, 1970] GATEHOUSE, R. N. B. (1970). Electronic Instruments and Computers for Sailing Yachts. *Journal of Navigation*, 23(01) :60–70.
- [GAYNOR, 1994] GAYNOR, J. E. (1994). Accuracy of sodar wind variance measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 15(2) :313–324.
- [Gentry, 1971] GENTRY, A. (1971). The aerodynamics of sail interaction. *AIAA Symposium on the Aero/Hydronautics of Sailing*.
- [Gentry, 1981] GENTRY, A. (1981). Sailboat Performance Testing Techniques. *AIAA Symposium on the Aero/Hydronautics of Sailing*.
- [Gerster, 2016] GERSTER, Y. (2016). *Determination of the wind speed measured by a moving anemometer at the mast head*. Master, University of Auckland.
- [Gilhousen, 1987] GILHOUSEN, D. B. (1987). A Field Evaluation of NDBC Moored Buoy Winds. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 4(1) :94–104.
- [Grewal *et al.*, 2013] GREWAL, M., ANDREWS, A. et BARTONE, C. (2013). *Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration*. Wiley, 3 édition.

- [Hanafusa *et al.*, 1982] HANAFUSA, T., FUJITANI, T., KOBORI, Y. et MITSUTA, Y. (1982). A new type sonic anemometer-thermometer for field operation. *Meteorology and Geophysics*, 33(1) :1–19.
- [Hasselmann *et al.*, 1973] HASSELMANN, K., BARNETT, T., BOUWS, E., CARLSON, H., CARTWRIGHT, D., ENKE, K., EWING, J., GIENAPP, H., HASSELMANN, D., KRUSEMAN, P., MEERBURG, A., MÜLLER, P., OLBERS, D., RICHTER, K., SELL, W. et WALDEN, H. (1973). Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave : : Repository Hydraulic Engineering Reports. Rapport technique, Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg.
- [Hayashi, 1987] HAYASHI, T. (1987). Dynamic response of a cup anemometer. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*.
- [Hoerner, 1965] HOERNER, S. (1965). *Fluid-Dynamic Drag*. Hoerner, Bakersfield, USA, second édition.
- [Holthuijsen, 2010] HOLTHUIJSEN, L. H. (2010). *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge university press.
- [Horel, 2011] HOREL, B. (2011). *Measurement of full scale wind turbulence on a moving yacht*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes ; Yacht Research Unit.
- [Horst, 1973] HORST, T. W. (1973). Corrections for Response Errors in a Three-Component Propeller Anemometer. *Journal of Applied Meteorology*, 12(4) :716–725.
- [Ibex, 2015] IBEX (2015). Ibex-lib.org.
- [International Electrotechnical Commision, 2005] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (2005). Wind turbines - Part 12-1 : Power performance measurements of electricity producing wind turbines. In *IEC 61400-12-1*, pages 1–8. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 1.0 édition.
- [Junzeng *et al.*, 2012] JUNZENG, X., QI, W., SHIZHANG, P. et YANMEI, Y. (2012). Error of Saturation Vapor Pressure Calculated by Different Formulas and Its Effect on Calculation of Reference Evapotranspiration in High Latitude Cold Region. *Procedia Engineering*, 28 :43–48.
- [Kaganov et Yaglom, 1976] KAGANOV, E. et YAGLOM, A. (1976). Errors in wind-speed measurements by rotation anemometers. *Boundary-Layer Meteorology*, 10 :15–34.
- [Kaimal et Businger, 1963] KAIMAL, J. C. et BUSINGER, J. a. (1963). A Continuous Wave Sonic Anemometer-Thermometer. *Journal of Applied Meteorology*, 2(1) :156–164.
- [Kalman, 1960] KALMAN, R. E. (1960). A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Journal of basic Engineering*, 82(Series D) :35–45.
- [Kapartis, 1999] KAPARTIS, S. (1999). Anemometer employing standing wave normal to fluid flow and travelling wave normal to standing wave.

- [Kerhascoët, 2015] KERHASCOËT, H. (2015). Procédé de détermination de consigne pour pilote automatique.
- [Kerhascoët *et al.*, 2016] KERHASCOËT, H., LAURENT, J., SENN, E. et HAUVILLE, F. (2016). Speedometer Fault Detection and GNSS Fusion using Kalman Filters. *In OCEANS 2016 - Monterey*.
- [Kondo *et al.*, 1971] KONDO, J., NAITO, G. I. et FUJINAWA, Y. (1971). Response of Cup Anemometer in Turbulence. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 49(April) :63–74.
- [Kristensen, 1993] KRISTENSEN, L. (1993). The cup anemometer and other exciting instruments. Rapport technique, Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark.
- [Kristensen, 1998] KRISTENSEN, L. (1998). Cup anemometer behavior in turbulent environments. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 15(1) :5–17.
- [Kristensen, 1999] KRISTENSEN, L. (1999). The perennial cup anemometer. *Wind Energy*, 2(1) :59–75.
- [LAMIRAUX, 1999] LAMIRAUX, C. (1999). Perfectionnement aux anemometres a ultrasons.
- [LAMIRAUX, 2008] LAMIRAUX, C. (2008). Anemometre a ultrasons perfectionne.
- [Larsen *et al.*, 1978] LARSEN, S., WELLER, F. W. et BUSINGER, J. A. (1978). A Phase-Locked Loop Continuous Wave Sonic Anemometer-Thermometer. *Journal of Applied Meteorology*, 18 :562–568.
- [Larsson, Lars. Eliasson E, 1994] LARSSON, LARS. ELIASSON E, R. O. M. (1994). *Principles of yacht design*. Adlard Coles Nautical, London, 3 édition.
- [Layer et Bretherton, 1954] LAYER, B. et BRETHERTON, M. (1954). The logarithmic sublayer and surface roughness. *In BRETHERTON, M., éditeur : Atm S 547 Boundary Boundary Layer Meteorology*, pages 5.1–5.7.
- [LCJ Capteurs, 2014] LCJ CAPTEURS (2014). lcjcapteurs.com.
- [Le Pelley et Modral, 2008] LE PELLEY, D. et MODRAL, O. (2008). V-SPARS : a combined sail and rig shape recognition system using imaging techniques. *3rd High Performance Yacht Desing Conference*, pages 57–66.
- [Llewelyn et Johnson, 1994] LLEWELYN, D. et JOHNSON, M. (1994). Rotor for measuring fluid speed and direction.
- [Localsolver, 2015] LOCALSOLVER (2015). localsolver.com.
- [MacCready Jr. et Jex, 1964] MACCREADY JR., P. B. et JEX, H. R. (1964). Response Characteristics and Meteorological Utilization of Propeller and Vane Wind Sensors. *Journal of Applied Meteorology*, 3 :182–193.
- [Marchaj, 2003] MARCHAJ, C. A. (2003). *SAIL PERFORMANCE : Techniques to Maximize Sail Power*. Adlard Coles Nautical, revised édition.

- [Mardia, 1975] MARDIA, K. (1975). Statistics of Directional Data. *Journal of the Royal Statistical Society*, 37(Series B) :349–393.
- [Mardia et Jupp, 1999] MARDIA, K. V. et JUPP, P. E. (1999). *Directional Statistics*. Wiley Series in Probability and Statistics. Wiley.
- [Martínez *et al.*, 2016] MARTÍNEZ, A., VEGA, E., PINDADO, S., MESEGUER, E. et GARCÍA, L. (2016). Deviations of cup anemometer rotational speed measurements due to steady state harmonic accelerations of the rotor. *Measurement*, 90(May) :483–490.
- [McCurdy, 1970] MCCURDY, R. S. (1970). *Improved Instrumentation for 12-meter Yachts*. Thèse de doctorat, MIT.
- [McCurdy, 2008] MCCURDY, R. S. (2008). Preliminary investigation of Methods to Ameliorate Wind Direction Maneuver Perturbance. Rapport technique, Ockam.
- [McCurdy et Pedrick, 1981] MCCURDY, R. S. et PEDRICK, D. R. (1981). Yacht Performance Analysis with Computers. In *Chesapeake Sailing Yacht Symposium*, Annapolis.
- [Milnes, 2016] MILNES, K. (2016). AC35 Streaming Data Interface Specification. Rapport technique 1.10, ACEA.
- [Mitsuta, 1966] MITSUTA, Y. (1966). Sonic anemometer-thermometer for general use. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Ser. II, 4(1962) :12–24.
- [Monna, 1978] MONNA, W. (1978). Comparative investigation of dynamic properties of some propeller vanes. Rapport technique, KNML.
- [Monna et Driedonks, 1978] MONNA, W. et DRIEDONKS, A. (1978). Experimental Data on the Dynamic Properties of Several Propeller Vanes. *Journal of Applied Meteorology*, 18 :699–702.
- [Morgere *et al.*, 2013] MORGERE, J., DOUGUET, R., DIGUET, J. et LAURENT, J. (2013). Coupled open navigation and augmented reality systems for skippers. In *3rd International Conference on Innovation in High Performance Sailing Yachts*, Lorient.
- [Morgère, 2015] MORGÈRE, J.-C. (2015). *Mobile Augmented Reality System for Marine Navigation*. Thèse de doctorat, UBS.
- [Mori, 1986] MORI, Y. (1986). Evaluation of Several "Single-Pass" ; Estimators of the Mean and the Standard Deviation of Wind Direction. *Journal of Applied Meteorology*, 25(10) : 1387–1397.
- [Musoff et Zarchan, 2009] MUSOFF, H. et ZARCHAN, P. (2009). *Fundamentals of Kalman Filtering : A Practical Approach, Third Edition*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston ,VA, progress i édition.
- [Nautical Angles, 2016] NAUTICAL ANGLES (2016). Wikipedia.
- [Ockam, 2009] OCKAM (2009). Ockam system manual. Rapport technique 203, Ockam.
- [Ockam, 2013] OCKAM (2013). BET Diagram.

- [Peña et Gryning, 2008] PEÑA, A. et GRYNING, S. E. (2008). Charnock's roughness length model and non-dimensional wind profiles over the sea. *Boundary-Layer Meteorology*, 128(2) :191–203.
- [Perez, 2005] PEREZ, T. (2005). *Ship Motion Control : Course Keeping and Roll Stabilisation Using Rudder and Fins*. Springer, advances i édition.
- [Pfister et al., 2013] PFISTER, R., SCHWARZ, K. A., JANCZYK, M., DALE, R. et FREEMAN, J. B. (2013). Good things peak in pairs : a note on the bimodality coefficient. *Frontiers in Psychology*, 4(3) :320–325.
- [Pindado et al., 2014] PINDADO, S., CUBAS, J. et SORRIBES-PALMER, F. (2014). The cup anemometer, A fundamental meteorological instrument for the wind energy industry. Research at the IDR/UPM institute. *Sensors (Switzerland)*, 14(11) :21418–21452.
- [Pindado et al., 2012] PINDADO, S., SANZ, A. et WERY, A. (2012). Deviation of Cup and Propeller Anemometer Calibration Results with Air Density. *Energies*, 5(12) :683–701.
- [Pinkerton, 1930] PINKERTON, R. M. (1930). Calibration and lag of a Friez type cup anemometer. Rapport technique, NACA, Langley.
- [Pinsker, 1963] PINSKER, W. (1963). The Static and Dynamic Response Properties of Incidence Vanes with Aerodynamic and Internal Viscous Damping. Rapport technique 652, Ministry of Aviation.
- [Plotkin et Katz, 1991] PLOTKIN, A. et KATZ, J. (1991). *Low-Speed Aerodynamics : From Wing Theory to Panel Methods*. Inc, McGraw-Hill.
- [Polhamus, 1968] POLHAMUS, E. (1968). Application of the Leading-Edge-Suction Analogy of vortex lift to the drag dur to lift of sharp-edge delta wings. Rapport technique, Langley Research Center, Washington.
- [Pons et Sánchez, 2004] PONS, A. et SÁNCHEZ, J. C. (2004). Racing Bravo . Un sistema de navegación para alta competición. *INGENIERIA NAVAL*, pages 329–342.
- [Prandtl, 1920] PRANDTL, L. (1920). Aerofoil lift and drag in theory. *In Jahrbuch der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Luftfahrt*, chapitre 5, pages 37–65. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [Ramachandran, 1969] RAMACHANDRAN, S. (1969). A theoretical study of cup and vane anemometers. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 95(403) :163–180.
- [Roncin, 2002] RONCIN, K. (2002). *Simulation Dynamique de la navigation de deux voiliers en interaction*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes.
- [Rongere et Kobus, 2008] RONGERE, F. et KOBUS, J.-M. (2008). Mesure des trois composantes du vent réel sur support flottant avec correction des mouvements de plateforme. Rapport technique, Ecole Centrale de Nantes.
- [Ruggles, 1970] RUGGLES, K. W. (1970). The Vertical Mean Wind Profile Over the Ocean for Light to Moderate Winds.

- [S. Grewal et P. Andrews, 2014] S. GREWAL, M. et P. ANDREWS, A. (2014). *Kalman Filtering : theory and practice using Matlab*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA.
- [Sanuki, 1952] SANUKI, M. (1952). Oscillation of wind vane in a wind fluctuating both in direction and speed. *Geofisica Pura e Applicata*, 22(3-4) :251–254.
- [Schotland, 1955] SCHOTLAND, R. M. (1955). The Measurement of Wind Velocity by Sonic Means.
- [Schrenk, 1929] SCHRENK (1929). *Problèmes et avancées dans l'aéronautique*. Brunn.
- [Stevens et al., 2015] STEVENS, B. L., LEWIS, F. L. et JOHNSON, E. N. (2015). *Aircraft Control and Simulation : Dynamics, Controls Design, and Autonomous Systems*. John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, NJ, USA.
- [Thierry, 2008] THIERRY, F. (2008). *Dynamique des fluides appliquée. Applications à l'aérodynamique*. Dunod, sciences s édition.
- [Titterton et Weston, 2004] TITTERTON, D. et WESTON, J. (2004). *Strapdown Inertial Navigation Technology*. IET, The Institution of Engineering and Technology, Michael Faraday House, Six Hills Way, Stevenage SG1 2AY, UK.
- [Troen et Lundtang Petersen, 1989] TROEN, I. et LUNDTANG PETERSEN, E. (1989). *European wind atlas*. Risø National Laboratory.
- [Van der Hoven, 1957] VAN DER HOVEN, I. (1957). Power Spectrum of Horizontal Wind Speed in the Frequency Range From 0.0007 To 900 Cycles Per Hour. *Journal of Meteorology*, 14 :160–164.
- [Voisin et al., 2007] VOISIN, D., DESJOYEUX, M. et RIVE, C. (2007). Dispositif et procede de determination du regime et/ou de la direction d'un ecoulement de fluide.
- [Weber, 1997] WEBER, R. O. (1997). Estimators for the Standard Deviation of Horizontal Wind Direction. *Journal of Applied Meteorology*, 36(10) :1403–1415.
- [Wieringa, 1967] WIERINGA, J. (1967). Evaluation and design of wind vanes. *Journal of Applied Meteorology*.
- [Wyngaard, 1992] WYNGAARD, J. C. (1992). Atmospheric turbulence. *Fluid Mech*, 24 :205–234.
- [Wyngaard et al., 1974] WYNGAARD, J. C., BAUMAN, J. et LYNCH, R. (1974). Cup anemometer dynamics. *In Flow : Its measurement and control in science and industry*, pages 701–708.
- [Yamartino, 1984] YAMARTINO, R. J. (1984). A Comparison of Several "Single-Pass" Estimators of the Standard Deviation of Wind Direction. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(9) :1362–1366.
- [Zhou et Kareem, 2002] ZHOU, Y. et KAREEM, A. (2002). Definition of wind profiles in ASCE 7. *Journal of Structural Engineering-Asce*, 128(3) :1082–1086.

From wind measurement to autopilot on sailboats : modelling, optimization & application of predictive signal processing

Abstract This thesis is part of NKE Marine's attempts to improve the quality of apparent and real wind measurements provided by its navigation unit. These improvements are expected to benefit both users and improve autopilot performance.

The first part describes the specific context of wind measurement on a sailboat, and the inherent issues. This study identified two knotty scientific problems : on-board wind measurements recorded by the sensor (linked to its design and response model) and how the wind triangle is reconstructed. The first objective of this thesis is therefore to propose a new methodology for the design of the wind vane that can match the sensor's profile with the boat's characteristics and its route planning. Improvements to this aerial sensor make it possible, on the one hand, to divide the response time by two (via the optimization of the shape of the sensors) and, on the other hand, to provide a useful signal that is twelve times more sensitive (via the application of predictive signal processing techniques that take account of sensor dynamics).

Next, previous work on the problem of reconstructing three-dimensional true wind is described in detail. This part begins with a presentation of the relevant standards and definitions of metrics, before examining some solutions that can take account of perturbations in apparent and true wind in the lower layer of the atmosphere. The following part examines current methods for reconstructing true wind. This analysis highlights the fact that these corrections are not applied in the correct frames. To overcome these problems, we propose a new approach to the reconstruction of the true wind, which implements the corrections described above. This manuscript ends with a presentation of the contribution to autopiloting. Specifically, it takes the form of a new concept, termed Super Mode, which can be overlaid onto classical modes of piloting. The aim is to improve safety in gusty conditions (Gust mode), and performance when surfing (Surf mode). The value of this innovation has been proven by competition victories; it has received an innovation award, and Surf mode is the subject of a patent application. The pilot is now able to glide like a human surfer. The final contribution to the autopilot concerns the integration of a new type of sensor : electronic telltales.

Finally, this manuscript contributes to our overall understanding of the problems and nuances that must be taken into account when developing or using a navigation unit and an autopilot. The work highlights the close correlation between the various sensors and the data calculated by the navigation unit. Significant improvements to the accuracy of both elements can be obtained when the concept of predictive filtering is extended and applied to the navigation unit as a whole.

Keywords anemometer, wind vane, sailboat, autopilot, optimization, signal processing, Kalman.

Résumé :

Cette thèse s'inscrit dans la démarche de l'entreprise nke, visant à améliorer la qualité de la mesure du vent apparent et réel de ses centrales de navigations. Ces améliorations doivent profiter à ses utilisateurs mais également contribuer à la performance du pilote automatique.

Dans un premier temps, est décrit le contexte spécifique à la mesure du vent depuis un voilier, et ses problématiques inhérentes. Suite à cette étude, deux types de verrous scientifiques ont été identifiés, à savoir : la mesure du vent sur le bateau par le senseur (lié à son design et à son modèle de réponse) et la chaîne de reconstruction du triangle de vent.

Cette thèse propose donc, dans un premier temps, une nouvelle méthodologie pour le design de la girouette permettant de mettre en adéquation le profil du capteur avec les caractéristiques du bateau et son programme de navigation. Les contributions à l'amélioration de ce capteur aérien ont permis, d'une part, de diviser son temps de réponse par deux via l'optimisation de la forme de ses senseurs, et d'autre part, de fournir un signal utile 12 fois plus réactif, en appliquant des techniques de traitement du signal prédictif, intégrant la dynamique du capteur.

Les travaux liés aux problématiques de reconstruction du vent réel en trois dimensions sont ensuite détaillés. Tout d'abord en s'intéressant aux normes et définitions des métriques qui lui sont associées, puis, en exposant les solutions permettant de prendre en compte les perturbations qui s'appliquent au vent apparent et réel dans la couche basse de l'atmosphère.

Dans un second temps, les méthodes actuelles de reconstruction du vent réel sont étudiées. Cette analyse met en exergue le fait que ces corrections ne s'appliquent pas dans les bons référentiels. Pour pallier à ces problèmes, nous proposons une nouvelle approche de reconstruction du vent réel, mettant en œuvre les méthodes de corrections précédemment décrites.

Ce manuscrit se termine par les apports au pilotage automatique. Ceux-ci prennent la forme d'un nouveau concept de "Mode Super", s'appliquant en sur-couche des modes de pilotage classiques. Leur rôle est d'améliorer la sécurité du pilotage pour le mode rafale et la performance pour le mode surf. Ces nouveautés ont été validées par des victoires en course, ont reçu un prix de l'innovation et a fait l'objet d'un dépôt de brevet pour le mode surf. Le pilote étant maintenant capable de barrer comme un humain dans les surfs. La dernière contribution apportée au pilote automatique concerne l'intégration d'un nouveau type de capteur : les penons électroniques.

Enfin, le manuscrit contribue à l'appréhension de la globalité des problématiques et subtilités à prendre en compte, lorsque l'on développe ou utilise une centrale de navigation et un pilote automatique.

Ces travaux ont mis en avant la forte corrélation entre les différents capteurs et données calculées par la centrale de navigation. Une avancée significative sur la précision de l'ensemble pourra être obtenue lorsque le concept du filtrage prédictif sera étendu et appliqué à la centrale de navigation dans sa globalité.

Mots-clés : anémomètre, girouette, voilier, pilote automatique, centrale de navigation, optimisation, traitement du signal, Kalman.

N° d'ordre : 433