



Les candidats doivent remplir cette page puis remettre cette chemise accompagnée de la version finale de leur mémoire à leur superviseur.

Numéro de session du candidat

Nom du candidat

Code de l'établissement

Nom de l'établissement

Sessions d'examens (mai ou novembre)

mai

Année

2013

Matière du Programme du diplôme dans laquelle ce mémoire est inscrit : physique
(Dans le cas d'un mémoire de langue, précisez la langue et s'il s'agit du groupe 1 ou 2.)

Titre du mémoire : Remonter le vent à voile

Déclaration du candidat

Cette déclaration doit être signée par le candidat, sans quoi aucune note finale ne pourra être attribuée.

Le mémoire ci-joint est le fruit de mon travail personnel (mis à part les conseils permis par le Baccalauréat International que j'ai pu recevoir).

J'ai signalé tous les emprunts d'idées, d'éléments graphiques ou de paroles, qu'ils aient été communiqués originellement par écrit, visuellement ou oralement.

Je suis conscient que la longueur maximale fixée pour les mémoires est de 4 000 mots et que les examinateurs ne sont pas tenus de lire au-delà de cette limite.

Ceci est la version finale de mon mémoire.

Signature du candidat :

Date :

Rapport et déclaration du superviseur.

Le superviseur doit remplir ce rapport, signer la déclaration et remettre au coordonnateur du Programme du diplôme la version définitive du mémoire dans la présente chemise.

Nom du superviseur [en CAPITALES]

Le cas échéant, veuillez décrire le travail du candidat, le contexte dans lequel il a entrepris sa recherche, les difficultés rencontrées et sa façon de les surmonter (voir les pages 13 et 14 du guide Le mémoire). L'entretien de conclusion (ou soutenance) pourra s'avérer utile pour cette tâche. Les remarques du superviseur peuvent aider l'examineur à attribuer un niveau pour le critère K (évaluation globale). Ne faites aucun commentaire sur les circonstances personnelles défavorables qui auraient pu affecter le candidat. Si le temps passé avec le candidat est égal à zéro, vous devrez l'expliquer et indiquer comment il vous a été possible de vérifier que le mémoire était bien le fruit du travail du candidat en question. Vous pouvez joindre une feuille supplémentaire si l'espace fourni ci-après est insuffisant.

Cette déclaration doit être signée par le superviseur, sans quoi aucune note finale ne pourra être attribuée.

J'ai lu la version finale du mémoire qui sera envoyée à l'examineur.

À ma connaissance, le mémoire constitue le travail authentique du candidat.

J'ai consacré heures d'encadrement au candidat pour ce mémoire.

Signature du superviseur :

Date :

Formulaire d'évaluation (réservé à l'examinateur)

Critères d'évaluation	Niveau					
	L'examinateur 1	Max.	L'examinateur 2	Max.	L'examinateur 3	
A Question de recherche	2	2	<input type="text"/>	2	<input type="text"/>	
B Introduction	0	2	<input type="text"/>	2	<input type="text"/>	
C Recherche	4	4	<input type="text"/>	4	<input type="text"/>	
D Connaissance et compréhension du sujet étudié	3	4	<input type="text"/>	4	<input type="text"/>	
E Raisonnement	4	4	<input type="text"/>	4	<input type="text"/>	
F Utilisation des compétences d'analyse et d'évaluation adaptées à la matière	3	4	<input type="text"/>	4	<input type="text"/>	
G Utilisation d'un langage adapté à la matière	3	4	<input type="text"/>	4	<input type="text"/>	
H Conclusion	2	2	<input type="text"/>	2	<input type="text"/>	
I Présentation formelle	4	4	<input type="text"/>	4	<input type="text"/>	
J Résumé	1	2	<input type="text"/>	2	<input type="text"/>	
K Évaluation globale	3	4	<input type="text"/>	4	<input type="text"/>	
Total sur 36	29		<input type="text"/>		<input type="text"/>	

3725 mots

Numéro de candidat :

MÉMOIRE DE RECHERCHE
Remonter le vent à voile

Travail présenté à
L'Organisation du Baccalauréat international

21 janvier 2013

Remerciements

J'aimerais remercier chaleureusement les personnes qui ont contribué, directement ou non, à la réalisation du présent mémoire de recherche, et sans l'aide desquelles ce document n'aurait pu voir le jour dans sa forme actuelle. Je remercie particulièrement ma superviseuse, _____, pour sa disponibilité ainsi que pour l'aide précieuse qu'elle m'a apportée. J'aimerais également souligner les judicieux conseils fournis par ma collègue de travail, _____, sur la version préliminaire du présent texte.

Résumé

Le domaine de la voile nécessite beaucoup d'étude afin d'en comprendre toutes les facettes et c'est ce qui le rend encore plus intéressant. Essayons d'en apprendre un peu plus sur les principes de la voile avec cette étude qui consiste à vérifier la capacité d'un voilier à remonter le vent. On se questionnera plus précisément sur la valeur de l'angle critique à partir duquel un voilier peut remonter le vent. Une comparaison sera faite entre la valeur obtenue de manière expérimentale et celle qui se trouve dans les manuels nautiques.

Pour tenter de répondre à la question de recherche, on simulera un voilier qui tente de remonter le vent. Il faudra, cependant, limiter les variables à mesurer afin que la tâche soit faisable. D'abord, un seul modèle réduit de voilier sera utilisé. Par la suite, les mesures seront prises uniquement dans l'air afin d'analyser l'aspect aérodynamique d'un voilier. Toutefois, pour que les résultats soient le plus semblable à la réalité, le voilier expérimental sera posé sur un rail à coussin d'air simulant l'aspect hydrodynamique. Puis, seule une voile carrée et rigide sera utilisée. Un graphique sera fait représentant le déplacement du voilier (Δx) en fonction du temps écoulé (t). Dans celui-ci, six fonctions linéaires seront présentes, ce qui les différenciera sera l'angle avec lequel le vent frappe le voilier (θ_1). Le taux de variation de chacune de ces droites équivaudra à la vitesse moyenne du voilier. Ensuite, un graphique représentant la vitesse du voilier (v) en fonction de l'angle avec lequel le vent le frappe (θ_1) sera effectué. Sa courbe sera de type linéaire. On pourra alors observer quel sera l'angle critique expérimental (θ_c) qui permettra au voilier d'avancer en remontant le vent. Cet angle sera égal au point où la droite du graphique croisera l'axe des abscisses.

La valeur de l'angle critique théorique est : $(45 \pm 10)^\circ$ ¹. La valeur obtenue de l'angle critique expérimental est : $(52 \pm 4)^\circ$. La valeur obtenue concorde avec la valeur de référence malgré toutes les simplifications majeures faites. Le fait que l'incertitude de l'angle critique expérimental soit inférieure à celle de l'angle critique théorique s'explique par le fait qu'on a minimisé les variables à mesurer. Ainsi, la valeur expérimentale concerne uniquement ce type de voilier, tandis que la valeur théorique englobe la majorité des voiliers.

¹ DEDEKAM, Ivar. *Voiles et gréements : les bons réglages de votre voilier en 150 illustrations*. Paris, Voiles et voiliers, 3^{ème} édition, 2008, 89 pages.

Table des matières

Introduction	5
Cadre théorique	6
<i>Définitions de termes maritimes</i>	6
<i>Notions de voile</i>	6
<i>Poussée vélique</i>	7
Cadre méthodologique	8
<i>Approche expérimentale</i>	8
<i>Type d'analyse</i>	10
<i>Élément de comparaison</i>	11
Instrumentation.....	11
Manipulation	12
Résultats	12
<i>Tableau 1</i>	13
<i>Justification des incertitudes</i>	13
<i>Graphique 1 : Le déplacement du voilier (Δx) en fonction du temps écoulé (t) selon l'angle avec lequel le vent frappe le voilier (θ_1)</i>	14
<i>Calcul de l'incertitude des taux de variation</i>	15
<i>Tableau 2</i>	16
<i>Graphique 2 : La vitesse du voilier (v) en fonction de l'angle avec lequel le vent frappe le voilier (θ_1)</i>	17
<i>Calcul de l'angle critique</i>	18
<i>Tableau 3</i>	18
Analyse.....	19
<i>Graphique 3: Comparaison des angles critiques</i>	19
Conclusion.....	20
Références	21
Annexe A : Tableaux des mesures	22

Introduction

Depuis près de 8300 ans², l'être humain vogue sur les rivières, les lacs, les mers et les océans. Heureusement, le bateau a connu une grande évolution. On a d'abord connu le canot, puis les voiliers et les bateaux à moteurs. D'ailleurs, chaque catégorie de navire a elle aussi beaucoup changé au fil des années. Par exemple, le voilier à son commencement était un radeau, puis il s'est transformé en un navire gigantesque et finalement est devenu le voilier que l'on connaît de nos jours. Cette évolution a permis aux capitaines d'être moins dépendants de la direction du vent et ainsi d'avoir plus de choix concernant la destination à prendre et par le fait même de naviguer de manière plus efficace et sécuritaire. Il est nécessaire d'être capable de remonter le vent, c'est-à-dire se diriger vers l'endroit d'où vient le vent, afin de pouvoir se rendre dans n'importe quelle direction. Le voilier est un moyen de transport qui nécessite beaucoup d'étude afin d'être maîtrisé.

Dans le cadre de cette expérience de laboratoire, on souhaite répondre à cette question : quel est l'angle du vent par rapport au voilier à partir duquel celui-ci pourra remonter le vent? Ainsi, on pourra mieux comprendre comment un voilier fait pour avancer dans la direction voulue. Il faudra évidemment utiliser un minimum de variables autrement la tâche serait trop complexe. On y parviendra en prenant des données concernant le déplacement du voilier en fonction du temps écoulé lorsqu'un vent frappe la voile selon un certain angle. Selon la théorie de la voile, l'angle critique à partir duquel un voilier pourrait avancer serait : $(45 \pm 10)^\circ$ ³. On déterminera aussi cette valeur de manière expérimentale. Ainsi, on pourra être en mesure de comparer les résultats et de juger de la qualité de l'expérience.

Ce rapport se divise comme suit. D'abord, le cadre théorique mentionnera quelques notions de voile. On y expliquera les différentes forces exercées sur un voilier, dont la poussée vélique. L'approche expérimentale de ce laboratoire suivra, on y énumérera les variables à mesurer et les valeurs uniques à noter. Par la suite, on décrira quel type d'analyse sera nécessaire afin de comparer les résultats obtenus à des valeurs théoriques. Puis, les tableaux et les graphiques représentant la situation choisie suivront. Finalement, il y aura une analyse des résultats qui nous permettra de conclure sur le sujet.

² SCHIAVONI, Giancarlo. *Les plus beau Voiliers du Monde-Dans le sillage des grands voiliers d'aujourd'hui*. Paris, Solar, 1994, 221 pages.

³ DEDEKAM, Ivar. *Voiles et gréements : les bons réglages de votre voilier en 150 illustrations*. Paris, Voiles et voiliers, 3^{ème} édition, 2008, 89 pages.

Cadre théorique

Définitions de termes maritimes⁴

- *Coque* : Enveloppe extérieure d'un bateau.
- *Dérive* : Surface plane, immergée, rapportée au plan longitudinal du navire, permettant de résister à la dérive due au vent.
- *Dériver* : S'éloigner de sa direction, en parlant d'un bateau, sous la poussée du vent ou sous l'action d'un courant.
- *Quille* : Partie axiale inférieure à la coque.
- *Remonter le vent* : Capacité d'un voilier de se diriger vers l'endroit d'où vient le vent.
- *Vent* : Déplacement de masse d'air, l'air qui est en trop se déplace afin de combler les vides.
- *Voile* : Large pièce de tissu assurant la propulsion des navires par la force du vent.
- *Angle critique* : Angle entre la direction du vent et la direction du bateau minimal.
- *Poussée vélique* : Vecteur représentant l'effort du vent sur la voile, il est perpendiculaire à la surface de la voile.

Notions de voile

Plusieurs facteurs influencent la vitesse d'un voilier et sa capacité à remonter le vent. Il ne peut y parvenir en ligne droite, il devra donc faire des zigzags pour y arriver, ce qu'on appelle du louvoyage dans le langage maritime. La figure 1 illustre ce principe.⁵ Ce qui influence la vitesse d'un voilier est, entre autres, la forme de la voile et de la coque, le matériel avec lequel le navire a été conçu ainsi que les divers ajustements de voile et de direction.

Un voilier est soumis à différents phénomènes physiques. Puisqu'un voilier utilise deux milieux afin de se déplacer, soit l'air et l'eau, son déplacement peut s'expliquer par la dynamique des fluides : l'aérodynamique pour la voilure et l'hydrodynamique pour la coque et la dérive. Le fait qu'un voilier puisse remonter le vent peut s'expliquer par la somme des

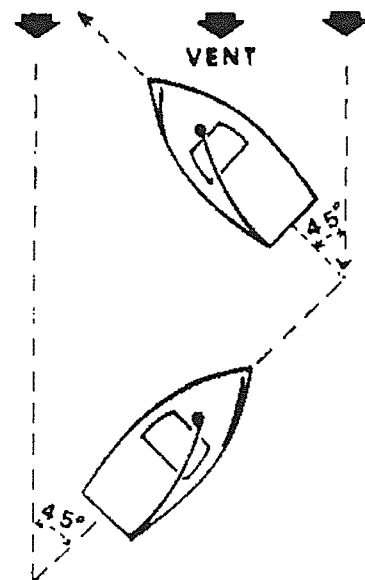


Figure 1 : Louvoyage

⁴ WIKIPÉDIA. *Glossaire maritime*. [en ligne]. http://fr.wikipedia.org/wiki/Glossaire_maritime (page consultée le 17 décembre 2012).

⁵ HYDROPTÈRE. *Comment avance un voilier?* [en ligne]. <http://tpe-hydroptere.wifeo.com/comment-avance-un-voilier.php> (page consultée le 17 décembre 2012).

différentes forces exercées par l'eau et par le vent dont résulte la force propulsive, soit la composante qui fait avancer le voilier.

Poussée vélique

Le principe de la voile se résume à récupérer l'énergie du vent et à la transmettre au voilier⁶. Donc, c'est le fait qu'un voilier soit soumis à différentes forces qui lui permet d'avancer. D'abord, il y a la poussée vélique (\vec{P}_v) qui est le vecteur représentant l'effort du vent sur la voile. La poussée vélique est perpendiculaire à la surface de la voile. Ensuite, il y a la force de dérive (\vec{F}_d), c'est-à-dire le vecteur représentant la force exercée par la dérive sur l'eau, qui est quant à lui perpendiculaire au voilier et orienté de direction contraire au vent. Puis finalement, il y a la force résultante de l'addition de la poussée vélique et de la force de dérive, soit la force propulsive (\vec{F}_p). Ce vecteur force est orienté parallèlement à l'axe du voilier et c'est lui qui le fait avancer. Pour mieux visualiser ces forces sur un voilier, on peut observer la figure 2.

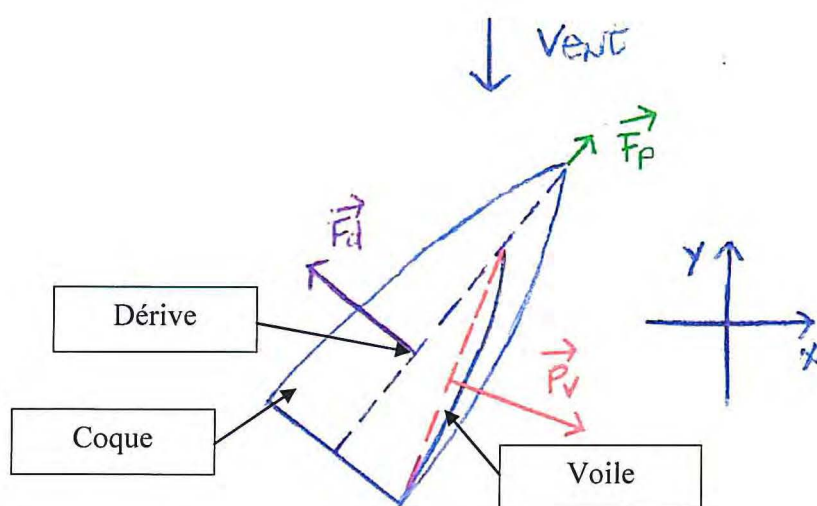


Figure 2 : Les différentes forces exercées sur un voilier

De plus, on connaît la deuxième loi du mouvement de Newton⁷ qui affirme que la somme des forces (\vec{F}) est égale au produit de la masse de l'objet (m) par son accélération (\vec{a}).

$$\sum \vec{F} = m\vec{a}$$

Équation 1

⁶ WIKIPÉDIA. Effort sur une voile. [en ligne]. http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile (page consultée le 24 novembre 2012).

⁷ BENSON, Harris. *Physique 1 : Mécanique*. ERPI. 4^{ème} édition.

En ce qui concerne ce travail de recherche, l'équation sera modifiée de la manière suivante:

$$\sum \vec{F} = \vec{P}_v + \vec{F}_d = \vec{F}_p = m\vec{a}$$

Équation 2

Où,

\vec{P}_v : Poussée vélique

\vec{F}_p : Force de propulsion

\vec{F}_d : Force de dérive

Si on met ces forces dans un diagramme des forces, on obtiendra la figure ci-dessous:

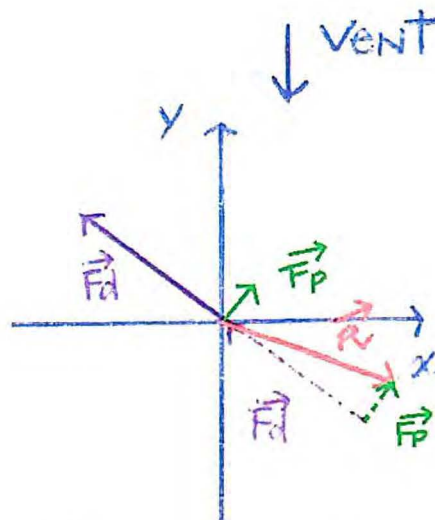


Figure 3 : Diagramme des forces exercées sur un voilier

Cadre méthodologique

Approche expérimentale

Pour tenter de répondre à la question de recherche : quel est l'angle critique à partir duquel un voilier va pouvoir remonter le vent, il faudra effectuer une expérience. Celle-ci consistera à imiter un voilier qui tente de remonter le vent. D'abord, on utilisera un chariot, qui servira de voilier expérimental, sur un rail à coussin d'air, et ce, pour deux raisons. Cet appareil servira à limiter la friction en plus d'imiter l'effet d'une dérive pour le voilier. Puis, une plaque en plastique rectangulaire sera placée en angle sur le chariot

afin d'imiter la voile. Elle devra être placée entre 15° et 25° ⁸ par rapport au voilier (θ_2 dans la figure 5 à la page suivante). Ensuite, il faudra simuler et mesurer, à l'aide d'un anémomètre numérique, un vent constant qui soufflera sur le voilier expérimental selon un angle variable. Finalement, il suffira de mesurer le déplacement du voilier en fonction du temps. Dans la figure 4, on voit à quoi ressemblera le montage. On a simplifié l'expérience en étudiant uniquement le côté aérodynamique d'un voilier et en utilisant une seule sorte de voile, la carré et dure au lieu d'une triangulaire et souple comme les voiliers de nos jours.

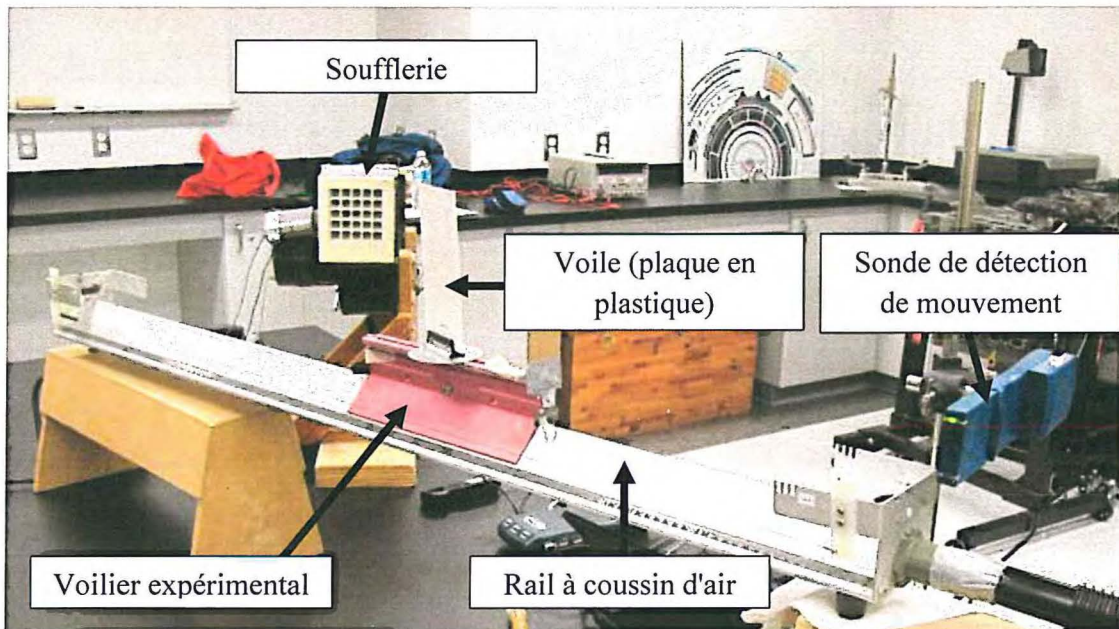


Figure 4 : Montage de l'expérience

⁸ LES FORCES AÉRODYNAMIQUES. Incidence. [en ligne], www.profauto.fr/10-Cours_Nautique/Forces_Aerodynamiques.pdf (page consultée le 24 novembre 2012).

Dans cette expérience, plusieurs mesures devront être effectuées. Les variables à mesurer sont le déplacement du voilier (Δx) à chaque intervalle de 0,1 seconde ainsi que l'angle du vent par rapport au voilier (θ_1) comme on le voit dans la figure 5. L'expérience sera faite à six reprises, selon six angles θ_1 différents. Les valeurs uniques à mesurer seront la vitesse du vent ainsi que l'angle de la voile par rapport au voilier (θ_2) qui se situera entre 15° et 25° ⁹ (figure 5).

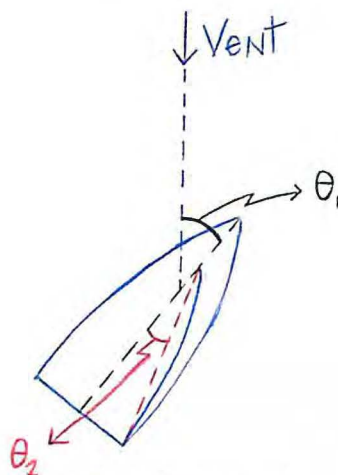


Figure 5 : Les angles à mesurer

Type d'analyse

Pour tenter de répondre à la question de recherche, un graphique sera analysé. D'abord, un graphique sera fait représentant le déplacement du voilier (Δx) en fonction du temps écoulé (t). Dans celui-ci, six fonction linéaires seront présentes. Les courbes devraient toutes être linéaires. Elles représenteront chacune le déplacement en fonction du temps selon l'angle avec lequel le vent frappe le voilier (θ_1). Le taux de variation de chacune de ces droites équivaudra à la vitesse moyenne du voilier.

Ensuite, un second graphique sera effectué. Il représentera la vitesse du voilier (v) en fonction de l'angle avec lequel le vent le frappe (θ_1). La courbe devrait être linéaire. On pourra alors observer quel sera l'angle critique expérimental (θ_c) qui permettra au voilier d'avancer en remontant le vent. Cet angle sera égal au point où la droite du graphique croisera l'axe des abscisses. On s'attend à ce que l'angle critique soit proche de $(45 \pm 10)^\circ$ ¹⁰.

⁹ LES FORCES AÉRODYNAMIQUES. Incidence. [en ligne], www.profauto.fr/10-Cours_Nautique/Forces_Aerodynamiques.pdf (page consultée le 24 novembre 2012).

¹⁰ DEDEKAM, Ivar. *Voiles et gréements : les bons réglages de votre voilier en 150 illustrations*. Paris, Voiles et voiliers, 3^{ème} édition, 2008, 89 pages.

Élément de comparaison

Concrètement, l'objectif de ce travail de recherche consiste à trouver de manière expérimentale l'angle critique à partir duquel un voilier peut commencer à remonter le vent. On comparera cette valeur avec celle que l'on retrouve dans les manuels de voile soit $(45 \pm 10)^\circ$ ¹¹. L'incertitude sur cette valeur de référence est élevée, car plusieurs aspects comme le matériel de fabrication, la forme du voilier et la forme de la voile, influencent la capacité d'un voilier à remonter le vent. On pourra ainsi juger de l'efficacité de la méthode employée afin de trouver la valeur expérimentale.

Instrumentation

Les instruments de mesure sont les suivants :

- Un anémomètre de marque Vernier modèle ANM-BTA : précision de 0,2 m/s pour les valeurs comprises entre 0,5 et 30 m/s
- Un rapporteur d'angle en plastique : précis au degré près
- Un rapporteur d'angle en bois : précis au degré près
- Une sonde de détection de mouvement (SONAR) de marque Vernier, fréquence des ultrasons : 40 Hz, résolution: 2mm, précision: 2mm
- Un module d'acquisition de données de marque Vernier et son programme *LoggerPro* version 3.2

Outre les instruments de mesure, on a le matériel suivant:

- Une soufflerie
- Un rail à coussin d'air et sa soufflerie
- Un compas en bois
- Un support universel
- Un chariot adapté au rail à coussin d'air
- Une plaque rectangulaire en plastique
- Un ordinateur
- Une roulette de ruban adhésif

¹¹ DEDEKAM, Ivar. *Voiles et gréements : les bons réglages de votre voilier en 150 illustrations*. Paris, Voiles et voiliers, 3^{ème} édition, 2008, 89 pages.

Manipulation

1. Placer la soufflerie sur la table de travail.
2. Fixer la plaque rectangulaire en plastique en angle (entre 15° et 25° ¹² par rapport au voilier (θ_2 dans la figure 5)) sur le chariot à l'aide du ruban adhésif, mesurer cet angle avec le rapporteur d'angle en plastique et mettre le chariot sur le rail à coussin d'air.
3. Ajuster la hauteur du rail à coussin d'air afin que la plaque rectangulaire installée sur le chariot soit à la même hauteur que le soufflerie.
4. Fixer le détecteur de mouvement au support universel. Ajuster sa hauteur afin qu'il soit au même niveau que la plaque rectangulaire.
5. Positionner le souffleur de travers au voilier expérimental (chariot) (θ_1 vaut 90°) à l'aide du compas et du rapporteur d'angle en bois (voir figure 6).
6. Mettre en marche la soufflerie, mesurer la vitesse du vent vis-à-vis le chariot à l'aide de l'anémomètre et noter le résultat (figure 7).
7. Mettre en marche le rail à coussin d'air.
8. Prendre en notes les données du déplacement du chariot en fonction du temps écoulé à l'aide du logiciel *LoggerPro* avec un intervalle de un dixième de secondes.
9. Répéter à cinq reprises les étapes 5 à 8 en vérifiant à chaque fois que la vitesse du vent est la même et en réduisant et en notant l'angle du vent par rapport au voilier (θ_1 dans la figure 3).



Figure 6 : Mesure de θ_1



Figure 7: Mesure de la vitesse du vent

Résultats

Tous les tableaux des mesures prises lors de l'expérience sont à l'annexe A. Chaque tableau est similaire seul l'angle entre le vent et la direction du voilier (θ_1) est varié, et ce entre 50° et 90° . La mesure de l'angle de la voile par rapport au voilier (θ_2) de $(21 \pm 1)^\circ$ ainsi que celle de la vitesse du vent soufflant sur la voile simulée de $(4,8 \pm 0,2)$ m/s ont été vérifiées à chaque essai. Afin de bien visualiser la situation, un tableau est présenté à la page suivante, à titre d'exemple, montrant les données brutes prises lors du premier essai de l'expérimentation.

¹² LES FORCES AÉRODYNAMIQUES. Incidence. [en ligne], www.profauto.fr/10-Cours_Nautique/Forces_Aerodynamiques.pdf (page consultée le 24 novembre 2012).

Tableau 1

ESSAI 1: Le déplacement du voilier en fonction du temps écoulé lorsque le vent le frappe à 90°

t	Δx	t	Δx	t	Δx
s	m	s	m	s	m
$\pm 0,1$	$\pm 0,002$	$\pm 0,1$	$\pm 0,002$	$\pm 0,1$	$\pm 0,002$
0,1	0,016	0,8	0,055	1,5	0,114
0,2	0,020	0,9	0,066	1,6	0,120
0,3	0,025	1,0	0,070	1,7	0,131
0,4	0,027	1,1	0,085	1,8	0,128
0,5	0,033	1,2	0,091	1,9	0,148
0,6	0,042	1,3	0,101	2,0	0,155
0,7	0,049	1,4	0,107		

t : Temps écoulé

Δx : Déplacement du voilier

Vitesse du vent (v_{vent}) : $(4,8 \pm 0,2)$ m/s

Angle variable dans lequel le vent frappe le voilier (θ_1) : $(90 \pm 3)^\circ$

Angle fixe de la voile par rapport au voilier (θ_2) : $(21 \pm 1)^\circ$

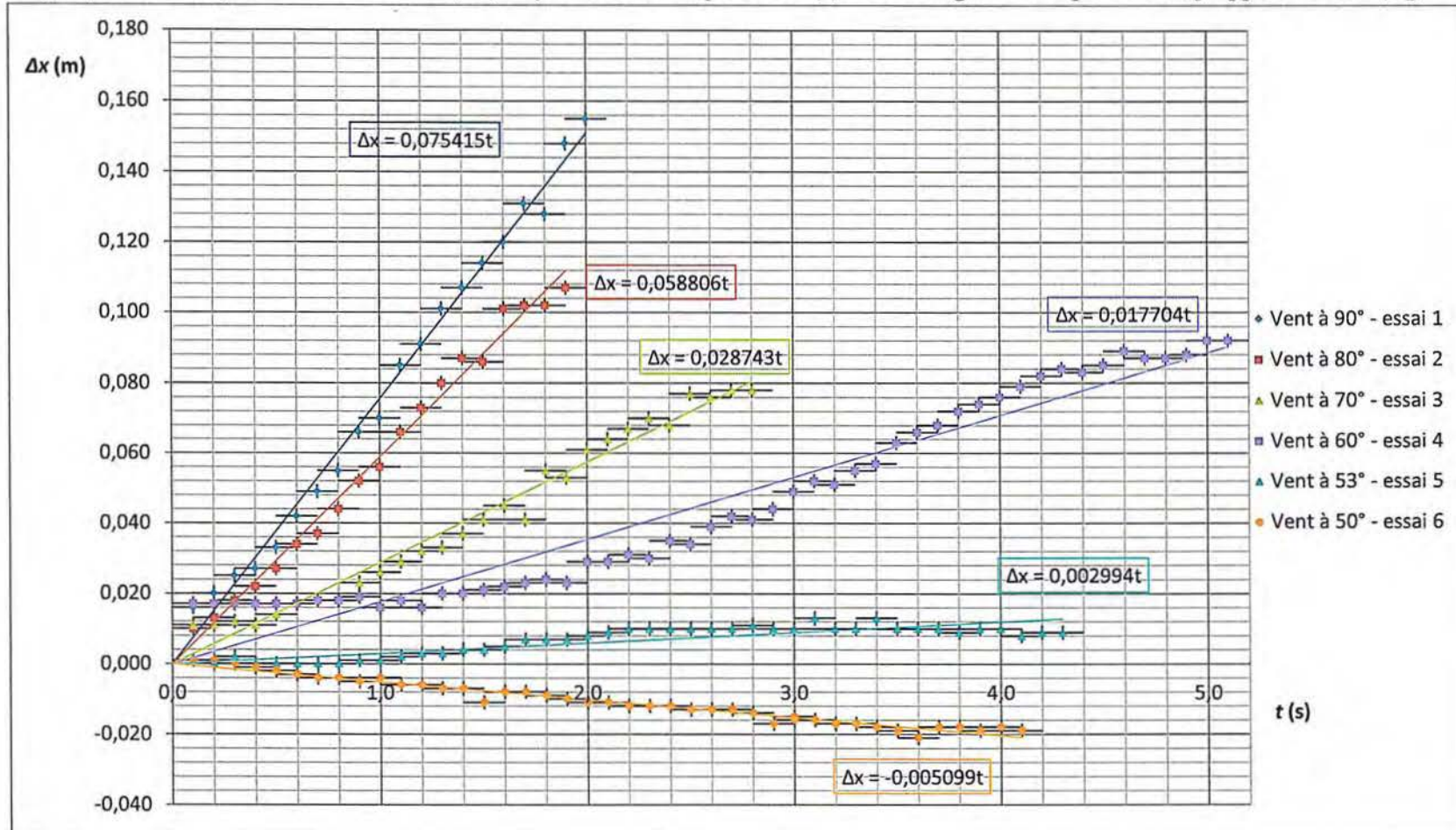
Justification des incertitudes

Le temps écoulé, le déplacement du voilier ainsi que la vitesse du vent sont des données prises par un logiciel, *LoggerPro*, et par des instruments de mesure numérique, un détecteur de mouvement et un anémomètre. Les incertitudes de ces données sont donc toutes déterminées par le fabricant. L'incertitude sur le temps est de $(0,1)$ s, l'incertitude sur le déplacement est $(0,002)$ m et l'incertitude sur la vitesse du vent est de $(0,2)$ m/s.

En ce qui concerne l'incertitude de l'angle avec lequel le vent frappe le voilier (θ_1), la précision de l'instrument utilisé afin de mesurer cet angle (rapporteur d'angle en bois) est précis au degré près. On divise la plus petite mesure par deux afin d'obtenir sa précision $\Delta\theta = 0,5^\circ$. Cependant, puisqu'on doit ajuster à deux reprises cet instrument afin d'obtenir une donnée il faut multiplier l'incertitude obtenue par deux $\Delta\theta = 1^\circ$. De plus, considérant l'effet de parallaxe et la difficulté à prendre cette mesure, on doit augmenter cette valeur. L'incertitude finale de l'angle avec lequel le vent frappe le voilier est donc de 3° .

Par la suite, l'incertitude de l'angle de la voile par rapport au voilier (θ_2) est de 1° , car c'est la précision du rapport d'angle en plastique est qu'il n'y a pas de facteurs qui pourraient augmenter cette valeur.

Graphique 1 : Le déplacement du voilier (Δx) en fonction du temps écoulé (t) selon l'angle avec lequel le vent frappe le voilier (θ_1)



Dans ce graphique qui illustre le déplacement du voilier (Δx) en fonction du temps écoulé (t) selon l'angle avec lequel le vent frappe le voilier (θ_1), les points expérimentaux pour chaque essai ont été reliés par une courbe de tendance calculée par le logiciel EXCEL. La relation est indiquée pour chaque essai sur le graphique. On peut remarquer une proportionnalité dans ce graphique. Plus l'angle du vent diminue, plus la pente de la courbe diminue aussi. On sait aussi que le taux de variation des pentes représente la vitesse du voilier grâce aux unités (m/s). Il serait donc intéressant de faire un graphique représentant la vitesse du voilier en fonction de l'angle du vent. Ainsi, on pourra être en mesure de déterminer à partir de quel angle le voilier peut remonter le vent. Il faudra, avant tout, effectuer quelques calculs afin d'obtenir les points et leurs incertitudes dans le graphique.

Calcul de l'incertitude des taux de variation

Voici un exemple de la méthode utilisée afin de trouver l'incertitude d'un taux de variation, on se servira des valeurs lorsque le vent est à 90° . La méthode employée est celle des pentes extrêmes en forme X. Prenons en considération les données suivantes:

$$t_1 = 0,3 \pm 0,1 \text{ s} \qquad \Delta x_1 = (0,025 \pm 0,002) \text{ m}$$

$$t_2 = (1,6 \pm 0,1) \text{ s} \qquad \Delta x_2 = (0,120 \pm 0,002) \text{ m}$$

On sait aussi que le taux de variation (v) vaut ceci :

$$v = \frac{\Delta x}{t} = 0,075418 \text{ m/s}$$

L'incertitude sur le taux de variation représentant la vitesse (v) se calcule de la manière suivante :

$$\Delta v = \left(\frac{\Delta(\Delta x_2) + \Delta(\Delta x_1)}{\Delta x_2 - \Delta x_1} + \frac{\Delta t_2 + \Delta t_1}{t_2 - t_1} \right) \times v$$

$$\Delta v = \left(\frac{0,002 + 0,002}{0,120 - 0,025} + \frac{0,1 + 0,1}{1,6 - 0,3} \right) \times 0,075418 = 0,01$$

La vitesse du voilier lorsque le vent était à 90° est donc de $(0,08 \pm 0,01) \text{ m/s}$.

Dans le tableau 2 ci-dessous, on retrouve les taux de variation du graphique 1 qui représente la vitesse du voilier en fonction de l'angle avec lequel le vent frappe le voilier (θ_1).

Tableau 2

La vitesse du voilier en fonction de l'angle avec lequel le vent frappe le voilier

θ_1	v
°	m/s
± 3	
90	0,08 \pm 0,01
80	0,059 \pm 0,009
70	0,029 \pm 0,004
60	0,018 \pm 0,002
53	0,003 \pm 0,001
50	-0,005 \pm 0,002

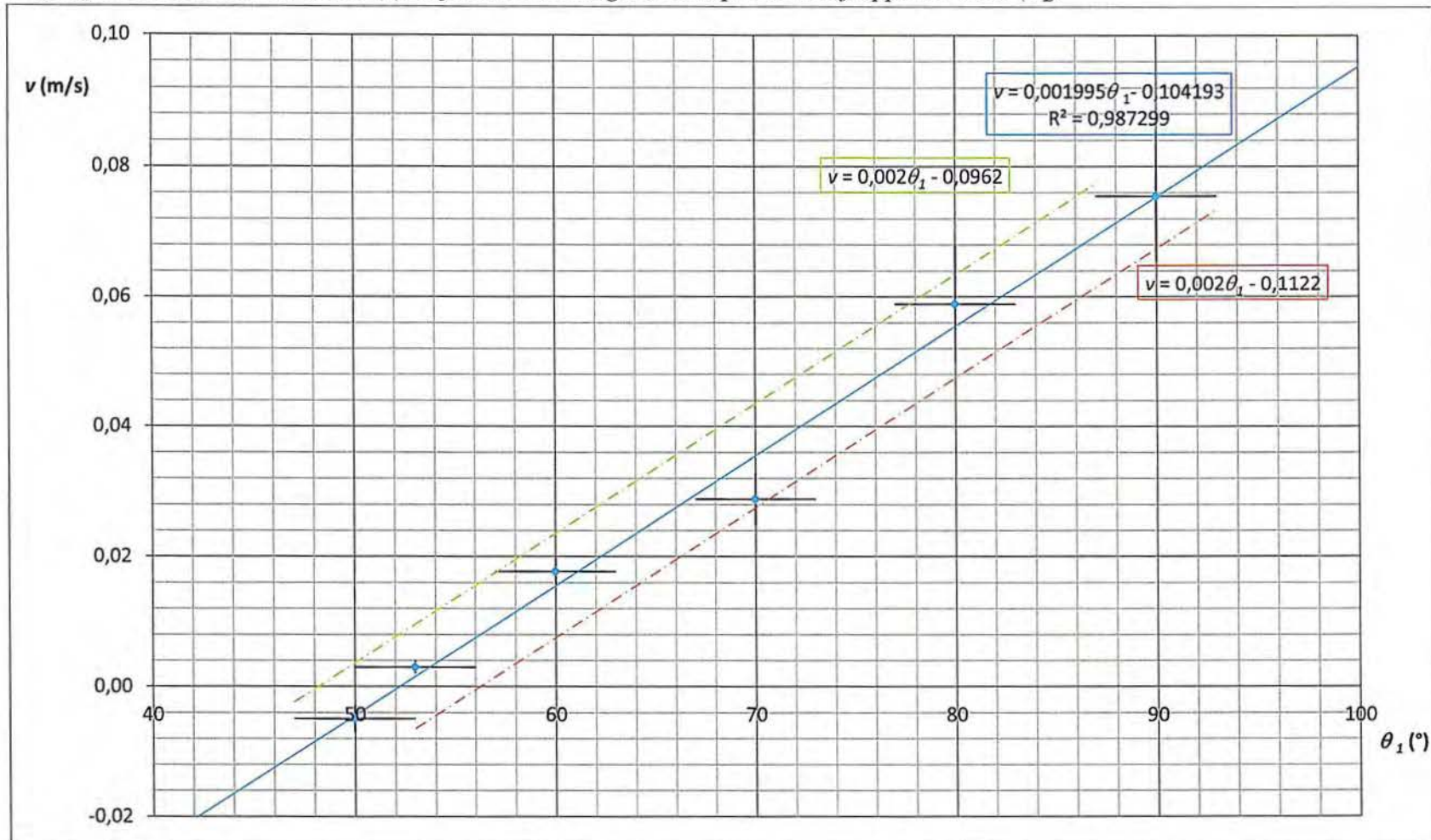
θ_1 : Angle avec lequel le vent frappe le voilier

v : Vitesse du voilier

Vitesse du vent (v_{vent}) : (4,8 \pm 0,2) m/s

Angle de la voile par rapport au voilier (θ_2): (21 \pm 1)°

Graphique 2 : La vitesse du voilier (v) en fonction de l'angle avec lequel le vent frappe le voilier (θ_1)



Calcul de l'angle critique

Selon les données obtenues lors du laboratoire, l'angle à partir duquel le voilier peut remonter le vent s'obtient avec l'équation de la droite du graphique 2. L'angle équivalent au point coïncidant avec l'axe des abscisses, soit lorsque la vitesse est nulle.

L'équation du graphique 2 est celle-ci :

$$v = 0,001995 \theta_1 - 0,104193$$

On cherche à quel angle $v = 0$ ce qui vaudra l'angle critique recherché (θ_c).

$$0 = 0,001995 \theta_c - 0,104193$$

$$\theta_c = 52,227 \dots^\circ$$

L'incertitude de cet angle se trouve par interpolation. On sait que l'incertitude de l'angle critique sera égal à la moitié de l'écart horizontal entre les deux droites.

$$\Delta\theta_c = \frac{\theta_{max} - \theta_{min}}{2}$$

Les angles (θ_{max} et θ_{min}) se trouvent à l'aide des équations des droites inférieure et supérieure. Il faut imposer une variable indépendante ($v = 0$), puis isoler l'angle.

$$\theta_{max} = \frac{0,1122}{0,002} \quad \text{et} \quad \theta_{min} = \frac{0,0962}{0,002}$$

Donc, l'incertitude de l'angle critique vaut :

$$\Delta\theta_c = \frac{\frac{0,1122}{0,002} - \frac{0,0962}{0,002}}{2} = 4^\circ$$

L'angle critique (θ_c) à partir duquel le voilier peut remonter le vent est : $\theta_c = (52 \pm 4)^\circ$.

Tableau 3

Angles critiques obtenus

θ_c expérimental	$(52 \pm 4)^\circ$
θ_c théorique	$(45 \pm 10)^\circ$

θ_c expérimental : Angle critique expérimental

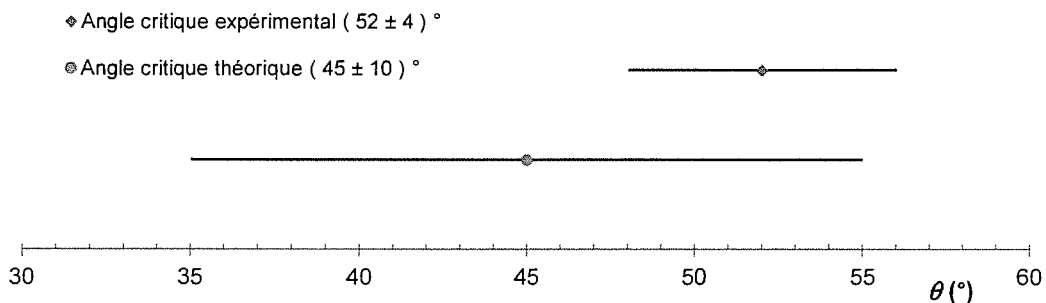
θ_c théorique : Angle critique théorique¹³

¹³ DEDEKAM, Ivar. *Voiles et gréements : les bons réglages de votre voilier en 150 illustrations*. Paris, Voiles et voiliers, 3^{ème} édition, 2008, 89 pages.

Analyse

Lors de ce laboratoire, on devait réussir à trouver l'angle critique à partir duquel un voilier allait pouvoir être en mesure de remonter le vent. Deux graphiques ont été faits afin d'y parvenir. Les courbes dans chacun des graphiques sont effectivement linéaires comme précisé dans le cadre méthodologique un peu plus tôt. Le 1^{er} graphique représente le déplacement du voilier (Δx) en fonction du temps écoulé (t) selon l'angle avec lequel le vent frappe le voilier (θ_1). Il a servi à déterminer la vitesse du voilier selon des vents de directions différentes, soit selon différents angles avec lequel le vent frappe le voilier. Ces vitesses ont servi dans le 2^e graphique. Le second graphique représente la vitesse du voilier (v) en fonction de l'angle avec lequel le vent frappe le voilier (θ_1). Il permet de déterminer l'angle critique recherché, soit l'angle du vent à partir duquel un voilier peut commencer à avancer. Le résultat obtenu est $(52 \pm 4)^\circ$, alors que la valeur de référence est de $(45 \pm 10)^\circ$ ¹⁴. À l'aide des échelles de comparaison suivantes, on peut observer l'exactitude du résultat.

Graphique 3: Comparaison des angles critiques



Comme on peut l'observer, la valeur obtenue concorde avec la valeur de référence puisque les domaines d'incertitude se chevauchent et ce, malgré toutes les simplifications majeures faites. Le fait que l'incertitude de l'angle critique expérimental soit inférieure à celle de l'angle critique théorique s'explique par le fait qu'on a minimisé les variables à mesurer. On a limité des conditions comme la forme de la voile, la forme du creux, la forme de la coque, le fluide dans lequel le voilier est, etc. Ainsi, la valeur expérimentale concerne uniquement ce type de voilier, tandis que la valeur théorique englobe la majorité des voiliers.

L'incertitude relative totale de l'angle critique expérimental est de 7,7%. Ce pourcentage provient directement du résultat obtenu $(52 \pm 4)^\circ$, soit en divisant son incertitude (4) par sa valeur (52) et multiplier le tout par 100. Ce résultat a été trouvé grâce aux points du graphique représentant la vitesse du voilier (v) en fonction de l'angle

¹⁴ DEDEKAM, Ivar. *Voiles et gréements : les bons réglages de votre voilier en 150 illustrations*. Paris, Voiles et voiliers, 3^{ème} édition, 2008, 89 pages.

avec lequel le vent frappe le voilier (θ_1). Les incertitudes relatives de ces points influencent le résultat et son incertitude relative totale. Les incertitudes relatives des angles se situent entre 3,3% et 6,0%. En ce qui concerne la vitesse du voilier lorsque le vent le frappe selon un angle compris dans l'intervalle de [60-90] °, les incertitudes relatives de la vitesse du voilier se situent entre 11% et 15%. Cependant, lorsque le vent frappe le voilier selon un angle de 50° ou de 53°, les incertitudes relatives de la vitesse sont respectivement de 40% et de 33%.

Plusieurs aspects de ce laboratoire ont pu influencer le résultat obtenu. Il y a entre autres la forme de la voile. Un creux dans une voile est nécessaire afin d'avoir une bonne poussée vélique. Donc, la petite planche de plastique qui a servi pour cette expérimentation ne maximisait pas la vitesse du voilier. La forme de la voile et la forme du creux de la voile sont nécessaires afin de bien remonter le vent. Ces deux aspects ayant été négligés influencent le résultat à la hausse. De plus, les vitesses obtenues ne reflètent pas la réalité, car l'eau dans laquelle les navires voguent impose une force de friction visqueuse non négligeable et proportionnelle à la vitesse. Le rail à coussin d'air était nécessaire afin de limiter les composantes de la problématique et de se concentrer uniquement sur un fluide, soit l'air. Cependant, cette technique influence le résultat.

Une amélioration possible de cette expérimentation pourrait être de rajouter des séries de données dans le 1^{er} graphique, c'est-à-dire dans celui du déplacement du voilier en fonction du temps selon l'angle avec lequel le vent frappe le voilier. Puisqu'il y a un lien direct entre les taux de variation du 1^{er} graphique et les points de la droite du 2^e graphique, on aurait plus de points dans le second graphique. Donc, la droite qui sert à trouver l'angle critique serait plus précise. De plus, un autre correctif facilement réalisable serait de faire des essais de l'expérimentation avec une voile de forme différente, ou avec une voile non rigide. Ainsi, on se rapprocherait encore plus de la réalité d'un voilier.

Conclusion

Cette expérimentation avait comme objectif de trouver de manière expérimentale l'angle critique à partir duquel un voilier va pouvoir remonter le vent. Grâce aux données prises en laboratoire, on a obtenu un angle critique (52 ± 4)°. Ce résultat reflète assez bien la réalité puisque, selon les livres nautiques, un voilier pourrait remonter le vent à (45 ± 10)°¹⁵. Faire de la voile est assez complexe et comprendre ce que l'on fait lorsqu'on manœuvre un voilier l'est encore plus. Il serait intéressant d'étudier la partie hydrodynamique. Puis, de combiner les deux études afin d'avoir une vision globale de la voile et d'en comprendre ses principes physiques.

¹⁵ DEDEKAM, Ivar. *Voiles et gréements : les bons réglages de votre voilier en 150 illustrations*. Paris, Voiles et voiliers, 3^{ème} édition, 2008, 89 pages.

Références

BENSON, Harris. *Physique 1 : Mécanique*. ERPI. 4ème édition.

BOISCLAIR, Gilles et PAGÉ, Jocelyne. *Guide des sciences expérimentales*, 3e édition, Montréal, Éditions du Renouveau Pédagogique Inc., 2004, 228 p.

DEDEKAM, Ivar. *Voiles et gréements : les bons réglages de votre voilier en 150 illustrations*. Paris, Voiles et voiliers, 3ème édition, 2008, 89 pages.

HYDROPTÈRE. *Comment avance un voilier?* [en ligne]. <http://tpe-hydroptere.wifeo.com/comment-avance-un-voilier.php> (page consultée le 17 décembre 2012).

LES FORCES AÉRODYNAMIQUES. *Incidence*. [en ligne], www.profauto.fr/10-Cours_Nautique/Forces_Aerodynamiques.pdf (page consultée le 24 novembre 2012).

SCHIAVONI, Giancarlo. *Les plus beau Voiliers du Monde-Dans le sillage des grands voiliers d'aujourd'hui*. Paris, Solar, 1994, 221 pages.

WIKIPÉDIA. *Effort sur une voile*. [en ligne]. http://fr.wikipedia.org/wiki/Effort_sur_une_voile (page consultée le 24 novembre 2012).

WIKIPÉDIA. *Glossaire maritime*. [en ligne]. http://fr.wikipedia.org/wiki/Glossaire_maritime (page consultée le 17 décembre 2012).

Annexe A : Tableaux des mesures

Tableau 1A

ESSAI 1: Le déplacement du voilier en fonction du temps écoulé lorsque le vent le frappe à 90°

t	Δx	t	Δx	t	Δx
s	m	s	m	s	m
$\pm 0,1$	$\pm 0,002$	$\pm 0,1$	$\pm 0,002$	$\pm 0,1$	$\pm 0,002$
0,1	0,016	0,8	0,055	1,5	0,114
0,2	0,020	0,9	0,066	1,6	0,120
0,3	0,025	1,0	0,070	1,7	0,131
0,4	0,027	1,1	0,085	1,8	0,128
0,5	0,033	1,2	0,091	1,9	0,148
0,6	0,042	1,3	0,101	2,0	0,155
0,7	0,049	1,4	0,107		

t : Temps écoulé

Δx : Déplacement du voilier

Vitesse du vent (v_{vent}) : $(4,8 \pm 0,2)$ m/s

Angle variable dans lequel le vent frappe le voilier (θ_1) : $(90 \pm 3)^\circ$

Angle fixe de la voile par rapport au voilier (θ_2) : $(21 \pm 1)^\circ$

Tableau 2A

ESSAI 2 : Le déplacement du voilier en fonction du temps écoulé
lorsque le vent le frappe à 80°

t	Δx	t	Δx	t	Δx
s	m	s	m	s	m
$\pm 0,1$	$\pm 0,002$	$\pm 0,1$	$\pm 0,002$	$\pm 0,1$	$\pm 0,002$
0,1	0,010	0,8	0,044	1,5	0,086
0,2	0,013	0,9	0,052	1,6	0,101
0,3	0,018	1,0	0,056	1,7	0,102
0,4	0,022	1,1	0,066	1,8	0,102
0,5	0,027	1,2	0,073	1,9	0,107
0,6	0,034	1,3	0,080		
0,7	0,037	1,4	0,087		

t : Temps écoulé

Δx : Déplacement du voilier

Vitesse du vent (v_{vent}) : $(4,8 \pm 0,2)$ m/s

Angle variable dans lequel le vent frappe le voilier (θ_1) : $(80 \pm 3)^\circ$

Angle fixe de la voile par rapport au voilier (θ_2): $(21 \pm 1)^\circ$

Tableau 3A

ESSAI 3 : Le déplacement du voilier en fonction du temps écoulé
lorsque le vent le frappe à 70°

t	Δx	t	Δx	t	Δx
s	m	s	m	s	m
$\pm 0,1$	$\pm 0,002$	$\pm 0,1$	$\pm 0,002$	$\pm 0,1$	$\pm 0,002$
0,1	0,011	1,1	0,029	2,1	0,064
0,2	0,011	1,2	0,032	2,2	0,067
0,3	0,012	1,3	0,033	2,3	0,070
0,4	0,011	1,4	0,037	2,4	0,068
0,5	0,014	1,5	0,041	2,5	0,077
0,6	0,017	1,6	0,045	2,6	0,076
0,7	0,018	1,7	0,041	2,7	0,078
0,8	0,018	1,8	0,055	2,8	0,078
0,9	0,023	1,9	0,053		
1,0	0,026	2,0	0,061		

t : Temps écoulé

Δx : Déplacement du voilier

Vitesse du vent (v_{vent}) : $(4,8 \pm 0,2)$ m/s

Angle variable dans lequel le vent frappe le voilier (θ_1) : $(70 \pm 3)^\circ$

Angle de la voile par rapport au voilier (θ_2) : $(21 \pm 1)^\circ$

Tableau 4A

ESSAI 4 : Le déplacement du voilier en fonction du temps écoulé
lorsque le vent le frappe à 60°

t	Δx	t	Δx	t	Δx
s	m	s	m	s	m
$\pm 0,1$	$\pm 0,002$	$\pm 0,1$	$\pm 0,002$	$\pm 0,1$	$\pm 0,002$
0,1	0,017	1,8	0,024	3,5	0,063
0,2	0,017	1,9	0,023	3,6	0,066
0,3	0,017	2,0	0,029	3,7	0,068
0,4	0,017	2,1	0,029	3,8	0,072
0,5	0,017	2,2	0,031	3,9	0,074
0,6	0,017	2,3	0,030	4,0	0,076
0,7	0,018	2,4	0,035	4,1	0,079
0,8	0,018	2,5	0,034	4,2	0,082
0,9	0,019	2,6	0,039	4,3	0,084
1,0	0,016	2,7	0,042	4,4	0,083
1,1	0,018	2,8	0,041	4,5	0,085
1,2	0,016	2,9	0,044	4,6	0,089
1,3	0,020	3,0	0,049	4,7	0,087
1,4	0,020	3,1	0,052	4,8	0,087
1,5	0,021	3,2	0,051	4,9	0,088
1,6	0,022	3,3	0,055	5,0	0,092
1,7	0,023	3,4	0,057	5,1	0,092

t : Temps écoulé

Δx : Déplacement du voilier

Vitesse du vent (v_{vent}) : $(4,8 \pm 0,2)$ m/s

Angle variable dans lequel le vent frappe le voilier (θ_1) : $(60 \pm 3)^\circ$

Angle fixe de la voile par rapport au voilier (θ_2) : $(21 \pm 1)^\circ$

Tableau 5A

ESSAI 5 : Le déplacement du voilier en fonction du temps écoulé
lorsque le vent le frappe à 53°

t	Δx	t	Δx	t	Δx
s	m	s	m	s	m
$\pm 0,1$	$\pm 0,002$	$\pm 0,1$	$\pm 0,002$	$\pm 0,1$	$\pm 0,002$
0,1	0,001	1,6	0,005	3,1	0,013
0,2	0,000	1,7	0,005	3,2	0,010
0,3	0,002	1,8	0,007	3,3	0,010
0,4	0,000	1,9	0,007	3,4	0,013
0,5	0,000	2,0	0,007	3,5	0,010
0,6	0,000	2,1	0,008	3,6	0,010
0,7	0,000	2,2	0,009	3,7	0,010
0,8	0,000	2,3	0,010	3,8	0,009
0,9	0,001	2,4	0,010	3,9	0,010
1,0	0,001	2,5	0,010	4,0	0,010
1,1	0,002	2,6	0,010	4,1	0,008
1,2	0,003	2,7	0,010	4,2	0,009
1,3	0,003	2,8	0,011	4,3	0,009
1,4	0,004	2,9	0,010		
1,5	0,004	3,0	0,010		

t : Temps écoulé

Δx : Déplacement du voilier

Vitesse du vent (v_{vent}) : $(4,8 \pm 0,2)$ m/s

Angle variable dans lequel le vent frappe le voilier (θ_1) : $(53 \pm 3)^\circ$

Angle fixe de la voile par rapport au voilier (θ_2) : $(21 \pm 1)^\circ$

Tableau 6A

ESSAI 6 : Le déplacement du voilier en fonction du temps écoulé
lorsque le vent le frappe à 50°

t	Δx	t	Δx	t	Δx
s	m	s	m	s	m
$\pm 0,1$	$\pm 0,002$	$\pm 0,1$	$\pm 0,002$	$\pm 0,1$	$\pm 0,002$
0,1	0,001	1,6	-0,008	3,1	-0,015
0,2	0,001	1,7	-0,008	3,2	-0,016
0,3	0,000	1,8	-0,009	3,3	-0,016
0,4	-0,001	1,9	-0,010	3,4	-0,017
0,5	-0,002	2,0	-0,011	3,5	-0,017
0,6	-0,003	2,1	-0,011	3,6	-0,018
0,7	-0,004	2,2	-0,012	3,7	-0,019
0,8	-0,004	2,3	-0,012	3,8	-0,021
0,9	-0,005	2,4	-0,012	3,9	-0,018
1,0	-0,004	2,5	-0,013	4,0	-0,018
1,1	-0,006	2,6	-0,013	4,1	-0,019
1,2	-0,006	2,7	-0,013	4,2	-0,018
1,3	-0,007	2,8	-0,014	4,3	-0,019
1,4	-0,007	2,9	-0,017		
1,5	-0,011	3,0	-0,015		

t : Temps écoulé

Δx : Déplacement du voilier

Vitesse du vent (v_{vent}) : $(4,8 \pm 0,2)$ m/s

Angle dans lequel le vent frappe le voilier (θ_1) : $(50 \pm 3)^\circ$

Angle de la voile par rapport au voilier (θ_2) : $(21 \pm 1)^\circ$